

П. М. БУЙ, Е. С. БЕЛОУСОВА, С. С. ТАТУР

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

Гомель 2018

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь»

П. М. БУЙ, Е. С. БЕЛОУСОВА, С. С. ТАТУР

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
по образованию в области транспорта и транспортной деятельности
для обучающихся по направлению специальности
1-37 02 04 «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»
в качестве практикума*

Гомель 2018

УДК 656.254:621.372.8(075.8)

ББК 39.278

Б90

Рецензенты: зав. кафедрой «Инфокоммуникационные технологии» д-р техн. наук, профессор *Ю. В. Цветков* (Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники); академик Международной академии связи, канд. техн. наук, профессор *Н. Ф. Семенюта*.

Буй, П. М.

Б90 Волоконно-оптические системы передачи : практикум / П. М. Буй, Е. С. Белоусова, С. С. Татур ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2018. – 126 с.
ISBN 978-985-554-785-4

Изложены краткие сведения из теории и порядок выполнения лабораторных и практических работ по дисциплине «Волоконно-оптические системы передачи», охватывающие вопросы оценки эффективности использования различных типов источников и приемников оптического излучения, типов оптических волокон, способов их соединения для организации оптической связи, современных сетей связи, использующих в качестве среды передачи оптические волокна.

Предназначен для студентов специальности 1-37 02 04 «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте».

УДК 656.254:621.372.8(075.8)

ББК 39.278

ISBN 978-985-554-785-4

© Буй П. М., Белоусова Е. С., Татур С. С., 2018

© Оформление. БелГУТ, 2018

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ ЛИНЕЙНОГО КОДИРОВАНИЯ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ

Цель работы: изучить требования и параметры кодов, применяемых в волоконно-оптических системах связи, научиться применять методы кодирования для двоичных последовательностей сигналов.

Краткие сведения из теории

Оптическое волокно как среда передачи сигнала, а также оптоэлектронные компоненты оптического передающего и приемного устройств налагают ограничения на характеристики цифрового сигнала, поступающего в линейный тракт волоконно-оптической системы передачи (ВОСП), поэтому этот сигнал подвергается перекодированию с помощью преобразователя кода в линейный код.

К кодам цифровых ВОСП предъявляются следующие *требования*:

1 Энергетический спектр кода в линии должен иметь минимальное содержание низкочастотных (НЧ) и высокочастотных (ВЧ) компонентов. Ограничение спектра в области нижних частот вызвано требованием передачи принимаемого сигнала без искажений в усилителе переменного тока фотоприемника. В противном случае для реализации оптимальных условий приема перед решающим устройством регенератора необходимо вводить дополнительное устройство, предназначенное для восстановления НЧ-составляющей. Это усложняет оборудование линейного тракта и увеличивает его стоимость. Существует еще одна причина, по которой необходимо уменьшить уровень НЧ-составляющей спектра. Оптическая мощность, излучаемая полупроводниковым лазерным диодом, зависит от окружающей температуры, но ее можно стабилизировать введением отрицательной обратной связи по среднему значению излучаемой мощности только в том случае, когда отсутствует НЧ-часть спектра, изменяющаяся во времени под

действием передаваемого информационного сигнала. В ином случае в цепи отрицательной обратной связи должно быть предусмотрено специальное устройство, компенсирующее эти изменения. Это также приводит к усложнению и удорожанию схемы оптического передатчика.

2 Код не должен налагать какие-либо ограничения на передаваемое сообщение и обеспечивать однозначную передачу любой последовательности единиц и нулей. Это требование формулируется как «независимость процесса кодирования источника информации».

3 Код в линии должен содержать информацию о тактовой частоте передаваемого сигнала. В приемнике эта информация используется для восстановления фазы и частоты колебания, необходимого для управления процессом принятия решения пороговыми устройствами регенераторов. Осуществить выделение тактовой частоты тем проще, чем больше число переходов уровня в цифровом сигнале, т. е. 10 или 01. В наилучшем случае энергетический спектр цифрового сигнала должен иметь дискретную составляющую на тактовой частоте. Если это условие не выполняется, то приходится вводить предварительную нелинейную обработку информационной цифровой последовательности.

4 Статистические характеристики цифровых сигналов в линиях не должны быть произвольными для обеспечения устойчивой работы регенераторов, в частности, должно быть ограничено максимальное число последовательностей символов одного уровня или одной амплитуды.

5 Структура цифрового сигнала в линии должна позволять организовывать контроль ошибок в регенераторах. Кодеры и декодеры линейного тракта, а также устройства контроля ошибок должны быть простыми в схемном отношении, иметь низкое потребление электроэнергии.

6 Код в линии должен иметь ограниченное число уровней передачи, что вызвано нелинейностью модуляционных характеристик и температурной зависимостью излучаемой оптической мощности лазерных диодов.

7 Желательно, чтобы код в линии позволял обеспечить передачу сервисных сигналов.

Реализация всех перечисленных требований к кодам в линиях осуществляется введением избыточности (R). Для двухуровневых кодов введение избыточности осуществляется увеличением тактовой частоты. При сохранении или снижении значений тактовой частоты избыточность вводится увеличением числа уровней передаваемого сигнала, т. е. использованием многоуровневых кодов.

$$R = \frac{F_{\text{тл}} \log_2(L) - F_{\text{т}} \log_2(m)}{F_{\text{тл}} \log_2(L)}, \quad (1)$$

где $F_{\text{тл}}$ – тактовая частота информационного цифрового сигнала на выходе кодера линейного тракта (или входе декодера линейного тракта), т. е. в линии передачи;

$F_{\text{т}}$ – тактовая частота информационного цифрового сигнала на входе кодера линейного тракта (или выходе декодера);

m – число разрешенных уровней входного сигнала;

L – число разрешенных уровней выходного сигнала.

Цифровая сумма D , накопленная или текущая, определяется алгебраической суммой амплитуд символов (b_i) от момента времени, равного нулю, до момента наблюдения за вычетом среднего значения сигнала (B_0), отнесенного к абсолютному значению разности соседних по величине уровней символов цифрового сигнала (Δ):

$$D_n = \frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^n (b_i - B_0). \quad (2)$$

Для анализа бинарных сигналов в ряде работ используется «диспаритетность», которая определяется разностью единиц и нулей цифрового сигнала в соответствии с рекомендацией ITU-T. При расчете диспаритетности бинарных сигналов следует число единиц умножить на вес одной единицы, равный $+0,5$, а число нулей – на вес одного нуля, равный $-0,5$. При таком расчете диспаритетности цифрового сигнала, содержащего нули и единицы, ее значение совпадает со значением цифровой суммы реализации этого же цифрового сигнала, содержащего -1 и $+1$.

Для анализа бинарных сигналов используется диспаритетность кодовых слов. Цифровая сумма d кодового слова или кодовой группы определяется по формуле

$$d_n = \sum_{l=-\infty}^k D_{nk}, \quad (3)$$

где n – число элементов блока;

l – порядковый индекс;

k – индекс текущего блока.

Чем больше число значений текущей диспаритетности $S(D)$, тем больше НЧ-составляющая спектральной плотности мощности цифрового сигнала.

Для бинарных сигналов максимальное число последовательных одинаковых по амплитуде символов состоит из максимального числа $l(1)$ последовательных единиц и максимального числа $l(0)$ последовательных нулей.

Для оптимизации спектра сигнала, подаваемого в линию связи, используется так называемое линейное кодирование. Оно должно обеспечить:

– минимальную спектральную плотность на нулевой частоте и ее ограничение на нижних частотах;

- информацию о тактовой частоте передаваемого сигнала в виде дискретной составляющей, легко выделяемой на фоне непрерывной части спектра;
- достаточную узкополосность непрерывного спектра для передачи через канал связи без искажений;
- малую избыточность для снижения относительной скорости передачи в канале связи;
- минимально возможные длины блоков повторяющихся символов («1» или «0») и диспаратетность (неравенство чисел «1» и «0» в кодовых комбинациях).

Для двоичного кодирования число уровней входного сигнала $m = 2$, а число уровней выходного сигнала n может быть 2 (двухуровневое кодирование) или 3 (трехуровневое кодирование). Двухуровневое кодирование может быть однополярным (+1, 0) и двухполярным или симметричным (+1, -1); трехуровневое – однополярным (+2, +1, 0) и двухполярным (+1, 0, -1). Например, оптические линии связи требуют однополярных методов кодирования, тогда как электрические линии связи могут использовать как однополярные, так и двухполярные методы кодирования.

NRZ – Non Return to Zero code – основополагающий двухуровневый код без возвращения к нулю, может быть как двухполярным, так и однополярным. На рисунке 1 представлен однополярный NRZ код. Недостатки кода:

- безызыточность исключает возможность контроля за качеством работы регенераторов без прерывания связи и использования специальных испытательных сигналов, т. к. любые комбинации импульсов и пауз при таком кодировании являются разрешенными;

- затрудняется синхронизация приемного устройства, установление границ тактовых интервалов, т. к. в спектре сигнала отсутствуют дискретные составляющие на тактовой частоте $f_T = 1/T$, либо на кратных ей частотах;

- возможность группирования импульсов и пауз в любом их сочетании приводит к значительному содержанию низкочастотных составляющих, вплоть до нулевой частоты, что усложняет обработку сигнала в приемном устройстве.

RZ – Return to Zero code – основополагающий трехуровневый код с возвращением к нулю (см. рисунок 1). В нем «1» и «0» передаются импульсом, длительность которого в два раза меньше, чтобы обеспечить запретные интервалы между элементарными сигналами. Формально полученный сигнал можно рассматривать как избыточный двоичный сигнал с тактовой частотой $f_T = 2/T$. Преимущество кода в том, что источник оптического излучения работает меньше времени, поэтому степень деградации его параметров снижается.

Недостаток кода RZ заключается в необходимости использования широкой полосы частот передачи из-за применения импульсов меньшей длительности. Код используется на линиях небольшой протяженности при отсутствии регенерационных участков.

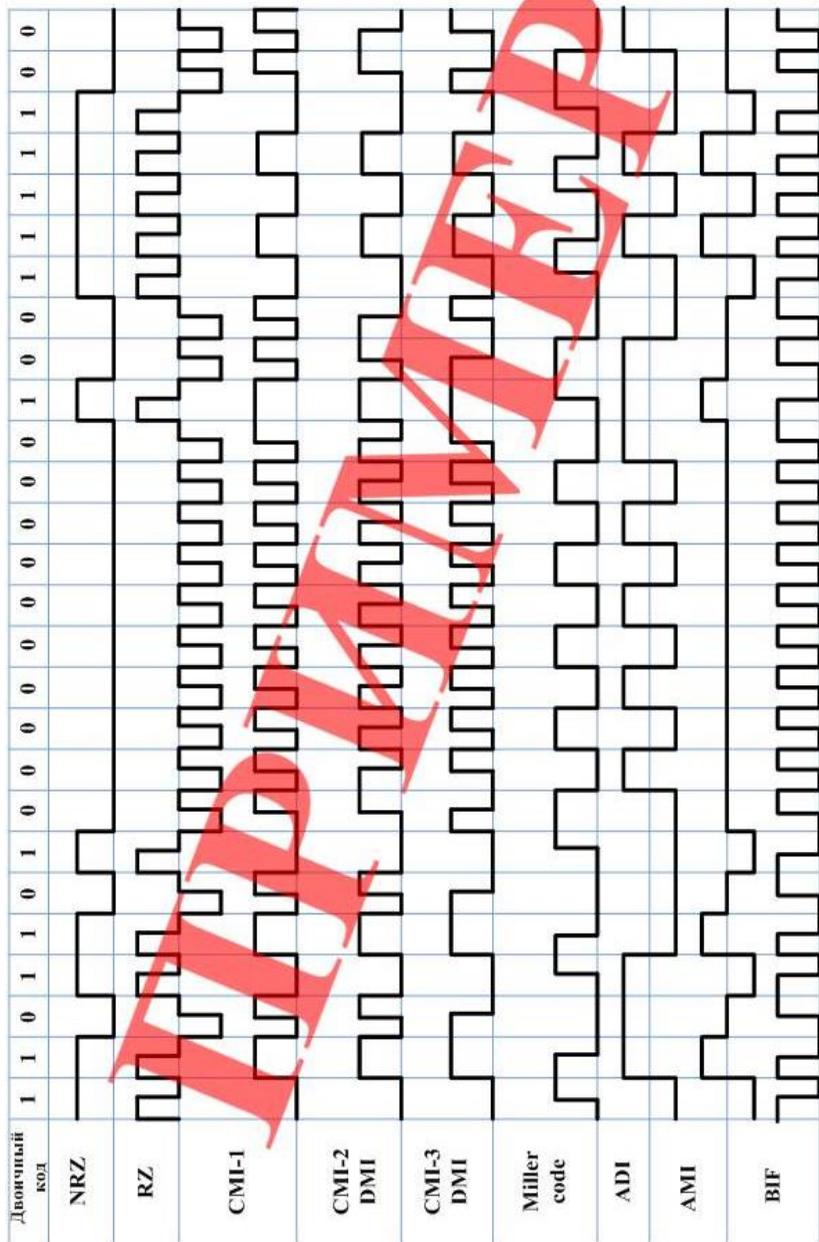


Рисунок 1 – Примеры линейного кодирования в канале связи

Для снижения содержания в спектре сигнала низкочастотных компонентов применяются блочные коды. $mBnB$ – общее обозначение класса блочных кодов (m – длина в битах блоков, на которые разбивается исходная последовательность, а n – соответствующая им длина в битах блоков, составленных из кодовых символов).

Предложен целый ряд кодов класса $mBnB$, предназначенных для передачи в линиях связи со скоростями несколько десятков мегабит в секунду. Некоторые из них были разработаны специально для оптических систем передачи 2, 8, 34 Мбит/с. К таким кодам относятся: CMI-1, CMI-2 (DMI), CMI-3, код Миллера, 1B2B.

Из них наиболее широко используется класс 1B2B – код, в котором 1 бит исходной последовательности длительностью T кодируется комбинацией из двух бит длительностью $T/2$ (относительная скорость передачи в канале связи при этом возрастает в два раза).

Коды CMI-1 (Coded Mark Inversion), CMI-2 или DMI (Differential Mark Inversion) и CMI-3 характеризуются увеличением скорости передачи в линии в два раза. Их особенностью является то, что единицы информационного сигнала передаются чередованием комбинаций символов 11 и 00. Различие алгоритмов формирования кодов CMI-1, DMI и CMI-3 состоит в особенности передачи нулей информационного сигнала. В CMI-1 нули информационного сигнала всегда передаются комбинацией символов 01; в DMI – комбинацией 01, если предшествующий символ 1 и 10, если 0; в CMI-3 – комбинацией 01, если предшествующий символ был 0 и 10, если 1.

ADI (Alternate Digit Inversion code) – двоичный код с инверсией полярности сигнала на каждом втором двоичном разряде (неважно, какой он: «1» или «0»); в результате формируется двуполярный двухуровневый код.

AMI (Alternate Mark Inversion code) – двоичный код двуполярный NRZ с инверсией на каждой «1»; может быть получен из кода ADI путем инверсии каждой четной «1»; в результате формируется двуполярный трехуровневый код.

В локальных сетях до недавнего времени самым распространенным методом кодирования был так называемый манчестерский код (BIF). Он применялся в технологиях Ethernet и Token Ring. В этом коде для кодирования нулей и единиц используется перепад потенциала, то есть фронт импульса. Единица кодируется перепадом от высокого уровня сигнала к низкому, а ноль – обратным перепадом. В начале каждого такта может происходить служебный перепад сигнала, если нужно представить несколько единиц или нулей подряд. В среднем ширина полосы манчестерского кода в полтора раза уже, чем у биполярного импульсного кода.

Манчестерский код имеет еще одно преимущество перед биполярным импульсным кодом: в последнем для передачи данных используется три уровня сигнала, а в манчестерском – два.

Код Миллера (Miller code) – двуполярный двухуровневый код класса 1В2В, имеющий множество состояний (00, 01, 10, 11), переходы между которыми описываются графом, приведенным на рисунке 2. Например, для приведенной на рисунке 1 исходной последовательности 1101101000000... процесс генерации (перехода из состояния в состояние) имеет вид:

1 → 11; 1 → 10; 0 → 00; 1 → 01; 1 → 10; 0 → 00; 1 → 01; 0 → 11 и т. д.

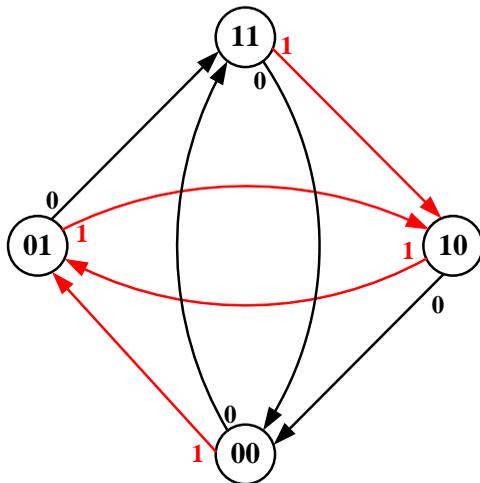


Рисунок 2 – Граф формирования кодовых комбинаций кода Миллера

При использовании кода Миллера скорость передачи увеличивается вдвое из-за увеличения в два раза тактовой частоты. Код Миллера так же, как СМІ-3, характеризуется более узким энергетическим спектром (рисунок 3).

В цифровых ВОСП большой скорости получили применение блочные коды, такие как 2В3В, 5В6В, 7В8В и другие, в которых $m > 1$, а $n = m + 1$ или $n = m + 2$. Эти коды формируют более сложные кодеры, чем кодеры кода 1В2В, но вводимая избыточность при этом меньше 0,5, т. е. эти коды не требуют увеличения тактовой частоты в два раза, что позволяет при тех же требованиях к сигналам на входе решающих устройств регенераторов увеличить длины регенерационных участков.

Таким образом, за счет усложнения кодеров и декодеров линейного тракта можно снизить стоимость ВОСП, уменьшая стоимость аппаратуры линейных трактов.

В таблице 1 приведены кодовые карты модификаций кодов 2В3В (альтернативного и low density соответственно), предназначенных для цифровых ВОСП. Представляет интерес low density код 2В3В, разработанный с целью снижения мощности излучения передатчика, поскольку вероятность появления единиц у этого кода равна 0,33.

Одиночные ошибки в цифровых линейных трактах при использовании блочных кодов $mBnB$ при $m > 2$ приводят к появлению одной, а иногда и большего числа ошибок в информационном сигнале на выходе декодера линейного тракта. Для кода 3B4B коэффициент размножения ошибок равен 1,5.

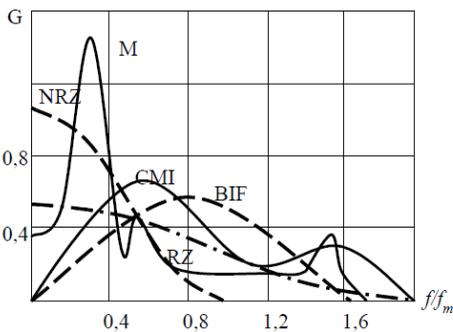


Рисунок 3 – Энергетические спектры линейных кодов

Контроль ошибок в регенераторах может быть реализован по контролю величины текущей дискретности или по контролю величины спектральных составляющих кода на частотах вблизи нуля. В коде 5B6B каждые пять последовательных символов исходного сигнала преобразуются в шестиразрядные комбинации линейного сигнала. В таблице 2 приведены кодовые карты модификаций кодов 5B6B.

Таблица 1 – Карта кода 2B3B

Исходная комбинация	Модификации кода 2B3B	
	альтернативный	low density
00	110	001
01	011	010
10	101	100
11	111	000

Кодовая карта кода 5B6B по алгоритму 1 получена по правилам составления альтернативных кодов, а в случае 2 – произвольно.

Код 7B8B имеет лучшие значения ряда параметров, чем код 5B6B. Например, избыточность кода 7B8B меньше, чем для кода 5B6B, однако большее количество свободных кодовых групп, не входящих в алфавиты, может быть использовано для передачи сервисных сигналов.

В некоторых высокоскоростных системах используются коды $mB1C$. При формировании кодов $mB1C$ к m информационным символам добавляется один дополнительный, обозначаемый 1C (Complimentary).

Дополнительный символ принимает значение 1 или 0 в зависимости от последнего (m -го) информационного символа. Если информационный символ был 1, то C-символ принимает значение 0, если же m -й символ имел значение 0, то символ C принимает значение 1. К кодам $mB1C$, используемым в цифровых ВОСП, относится бифазный код (или Manchester), коды 8B1C и 10B1C.

Таблица 2 – Карты кодов 5В6В

Исходная комбинация	Алгоритм 1	Алгоритм 2	Исходная комбинация	Алгоритм 1	Алгоритм 2
00000	010100	101000	10000	001011	100010
00001	011100	011000	10001	100010	100011
00010	110001	100100	10010	100100	100101
00011	101001	000111	10011	111000	100110
00100	011010	010100	10100	001001	101001
00101	010011	001011	10101	000101	101010
00110	101100	001101	10110	101010	101100
00111	000110	001110	10111	011001	001010
01000	100110	001100	11000	010010	110001
01001	010101	010011	11001	001101	110010
01010	101000	010101	11010	110010	110100
01011	011000	010110	11011	010110	000110
01100	000111	011001	11100	100101	111000
01101	100001	011010	11101	100011	010001
01110	010001	011100	11110	001110	001001
01111	110100	010010	11111	001010	000101

Бифазный код в терминах кодов $mB1C$ можно записать как код $1B1C$. Его избыточность равна $0,5$, т. е. тактовая частота сигналов в линии при использовании этого кода увеличивается в 2 раза. Для снижения избыточности кода значение m следует увеличивать, но при этом увеличивается и максимальное число последовательных одинаковых символов, поскольку для кодов $mB1C$ оно равно $(m + 1)$. Если устойчивая работа регенераторов при формировании тактового синхросигнала обеспечивается при числе одинаковых символов не более 10, то в цифровых ВОСП применяются коды с $m < 10$, такие как $8B1C$ и $10B1C$.

Порядок выполнения работы

1 Изучите краткие сведения из теории и ответьте на контрольный вопрос, заданный преподавателем.

2 Выберите и запишите исходные данные для расчета из таблицы 3 в соответствии с заданным вариантом.

3 Используя теоретические сведения, закодируйте заданную по заданию кодовую последовательность, используя коды NRZ, RZ, CMI, DMI, CMI-3, код Миллера, ADI, AMI, Манчестерский код. Результат выполнения задания представьте в виде рисунка (см. рисунок 1).

4 Заданную по заданию кодовую последовательность закодируйте кодом 2В3В и 5В6В, используя таблицы 1 и 2.

5 Сделайте вывод по работе.

Таблица 3 – Исходные данные

Номер варианта	Кодовая последовательность	Номер варианта	Кодовая последовательность
1	101111110110111011011010	8	0010100111101110001101010
2	0101110100010111101000001	9	1010111011011000011010011
3	1111000100001111000110101	10	1100110010101011110110000
4	0101011110111000011100000	11	0001000110111011010100111
5	0000111101010100111000110	12	0101110101101000111010111
6	0101000011110101001011000	13	0000001101010111101110010
7	0101010001110100001111011	14	1110111100010101100111001

Содержание отчета

- 1 Ответ на контрольный вопрос.
- 2 Исходные данные для выполнения работы.
- 3 Закодированные кодовые комбинации.
- 4 Вывод.

Контрольные вопросы

- 1 Требования, предъявляемые к кодам, используемым в ВОСП.
- 2 Параметры кодов.
- 3 Типы кодирования, используемого в ВОСП.
- 4 NRZ код и его недостатки.
- 5 RZ код и его недостатки.
- 6 Блочные коды.
- 7 Код 1В2В и его недостатки.
- 8 Отличия СМ1-1 и СМ1-2 кодов.
- 9 Отличия СМ1-2 и СМ1-3 кодов.
- 10 Отличия АМ1 и АД1 кодов.
- 11 Принцип работы Манчестерского кода.
- 12 Особенности кода Миллера.
- 13 Использование графа для представления переходов между кодовыми комбинациями.
- 14 Отличия энергетических спектров кодов.
- 15 Коды 5В6В и 7В8В.
- 16 Принцип кодирования *m*В1С кодов.

Лабораторная работа № 2

ИЗУЧЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: изучить принципы действия оптоволоконных лазеров и диодов, научиться определять апертуру оптического волокна, нормированную частоту, количество мод и эффективность ввода оптического излучения в волокно.

Краткие сведения из теории

Оптические передатчики (ОП), применяемые в ВОСП, предназначены для преобразования электрических сигналов в оптические. С этой целью выходное излучение оптического источника модулируется в соответствии с входными электрическими сигналами, поступающими от передающего источника сообщений.

По характеру модуляции оптические передатчики делятся на передатчики с *прямой* (внутренней) и *внешней модуляцией* (рисунок 1).

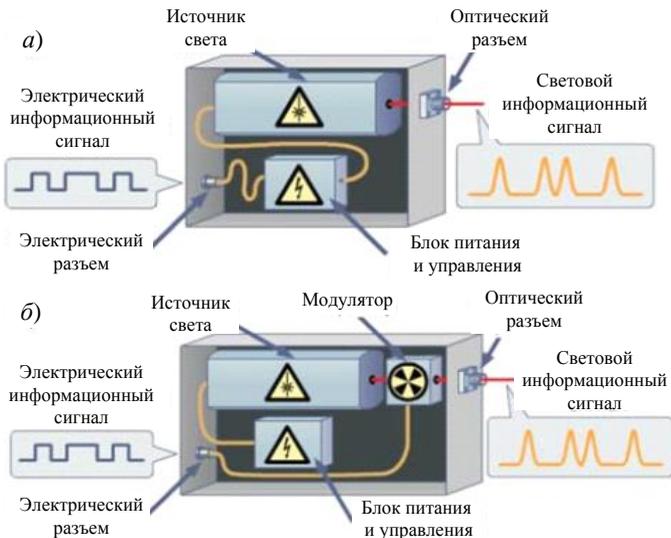


Рисунок 1 – Схемы оптических передатчиков с прямой (а) и внешней (б) модуляцией

В оптических передатчиках с *прямой* модуляцией мощность излучения источника света модулируется внешним электрическим током питания. В цифровых системах связи на основе передатчиков с прямой модуляцией используется простейший оптический формат передачи данных, при котором логическому нулю соответствует выключенное состояние источника излучения, а логической единице – включенное.

При скоростях передачи 10 Гбит/с и выше используются передатчики с *внешней* модуляцией. Источниками излучения в таких передатчиках, как правило, являются узкополосные одномодовые непрерывные полупроводниковые лазеры. Непрерывное оптическое излучение модулируется внешним модулятором, что обеспечивает формирование оптического сигнала с минимальной спектральной шириной. Кроме того, применение внешней модуля-

ции позволяет использовать более сложные форматы модуляции и применять поляризационное разделение сигналов. Передатчики с внешней модуляцией используются в системах дальней связи, в которых требования к качеству оптического сигнала особенно высоки. Максимальная скорость передачи информации, ограниченная быстродействием модулятора, составляет 40 Гбит/с. Для увеличения скорости передачи по одному каналу свыше 40 Гбит/с была предложена техника оптического временного уплотнения (OTDM). Такие системы работают со специальными источниками излучения – лазерами с синхронизацией мод, которые генерируют непрерывную последовательность ультракоротких импульсов (УКИ) света.

Источниками излучения в оптических передатчиках с прямой модуляцией являются полупроводниковые светоизлучающие диоды (светодиоды) или лазеры. Передатчики на основе светодиодов используются совместно с многомодовым волокном в низкоскоростных системах передачи информации на короткие расстояния, но постепенно вытесняются лазерными передатчиками. Основными недостатками светодиодов являются малая скорость передачи информации, малая выходная мощность, широкая полоса спектра и большая расходимость излучения. С другой стороны, светодиоды – более дешевые и неприхотливые приборы, которые вполне подходят для ряда систем небольшой протяженности или средней протяженности, но с малой скоростью передачи информации (менее 1 Гбит/с). Поэтому они широко используются в замкнутых системах видеонаблюдения, в локальных вычислительных сетях (ЛВС), в измерительных и других сетях, построенных на основе многомодового оптического волокна. Применение светодиодов в аппаратуре связи позволяет существенно удешевить приемопередающее оборудование, что и является причиной использования кабелей с многомодовым волокном при строительстве ЛВС. В настоящее время с учетом снижения стоимости лазеров целесообразно применять вместо многомодового оптического волокна со светодиодами одномодовое оптическое волокно с лазерами в качестве оптических передатчиков. В городских сетях связи и системах дальней связи в качестве источников излучения используются полупроводниковые лазеры, обеспечивающие существенно большую вводимую в одномодовое волокно мощность, максимальную скорость передачи информации, обладающие существенно более узким спектром излучения по сравнению со светодиодами.

В системах передачи при скоростях до 2,5 Гбит/с применяются многомодовые **лазеры с резонатором Фабри – Перо** (рисунок 2). Роль зеркал-отражателей выполняют торцы полупроводникового кристалла.

Данный тип лазеров позволяет получить излучение на желаемой длине волны, а также боковые моды меньшей амплитуды, отделенные промежутками порядка 1 нм. Полная выходная мощность стабильна, однако имеет место изменение мощности отдельных мод, что, в свою очередь, приводит к возрастанию хроматической дисперсии, и, как следствие, к возрастанию уровня

шумов в выходном сигнале. Следует отметить чувствительность данного типа лазеров к отражениям от внешних поверхностей оптических разъемов. Данное свойство также влияет на распределение мощности сигнала по отдельным модам.

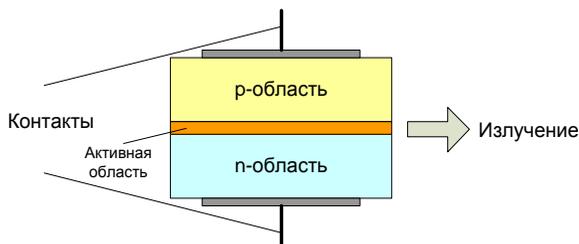


Рисунок 2 – Структура лазеров с резонатором Фабри – Перо

При скоростях передачи 2,5 Гбит/с и выше применяются **лазеры с распределенной обратной связью** (Distributed Feed Back – DFB). В их структуре используется брэгговская дифракционная решетка для дополнительного уменьшения ширины линии генерации, которая служит механизмом обратной связи. Формируется она в активной зоне между двумя слоями лазерной структуры (рисунок 3).

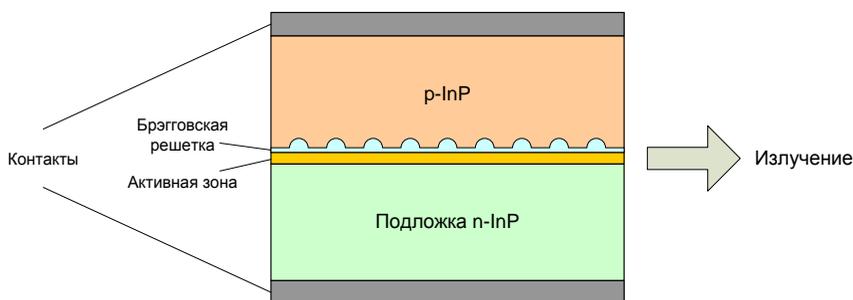


Рисунок 3 – Структура DFB-лазеров

Таким образом, DFB-лазер имеет встроенные возможности выбора длины волны благодаря механизму обратной связи. Обратная связь не локализована в одном месте, а распределена по длине резонаторной полости.

Лазеры с распределенной обратной связью позволяют ослабить влияние хроматической дисперсии, т. к. они работают в одномодовом одночастотном режиме, а в этом случае достигается минимальная ширина спектра излучения.

Достигается данный эффект размещением зеркал на концах усиливающей области. В ней самой создается периодическая решетка показателя преломления. Период решетки d подобран так, чтобы условие Брэгга выполнялось для

отражения в обратном направлении. С учетом показателя преломления n условие Брэгга имеет вид:

$$2nd = \lambda. \quad (1)$$

Условие отражения от периодической структуры выполняется для лучей обоих направлений. Таким образом, периодическая решетка создает обратную связь в обоих направлениях, распределенную по всей длине лазера. Поскольку обратная связь, создаваемая периодической решеткой, является селективной, то в DFB-лазерах обеспечивается режим одномодовой генерации. Еще одно преимущество DFB-лазеров – возможность размещать их непосредственно на поверхности полупроводниковой подложки и подключать к ОБ на поверхности этой подложки, создавая интегральные оптические устройства.

В процессе работы параметры брэгговской решетки могут изменяться (нагрев, изменение тока накачки, влияние отражений от оптических разъемов и т. д.), что приводит к существенному изменению длины волны излучения лазера. Данные проблемы решаются путем добавления некоторых компонентов в структуру лазера: фотодиода для мониторинга выхода, термоэлектрического охладителя, схемы обратной связи для управления выходом и поддержания желаемой частоты.

Лазер с распределенными брэгговскими отражателями (Distributed Brag Reflector – DBR) содержит селективный элемент – брэгговскую решетку, расположенную в неактивной зоне (рисунок 4).

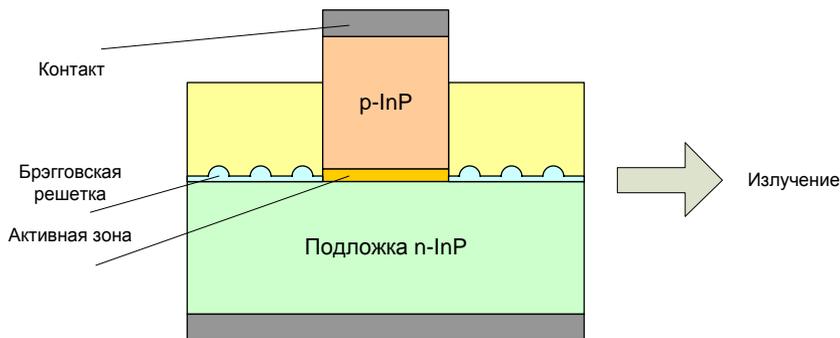


Рисунок 4 – Структура DBR-лазеров

Таким лазером обеспечивается более узкая, по сравнению с предыдущими типами, ширина спектра. Спектр отражения брэгговского отражателя определяется числом интерферирующих отраженных пучков, которое равно числу штрихов решетки. С увеличением числа интерферирующих пучков ширина спектра отражения уменьшается. Поэтому увеличением числа штрихов можно добиться того, что условия генерации будут выполняться только для одной

моды. Это обеспечивает поддержание режима одночастотной одномодовой генерации.

В лазерах с вертикальным резонатором и поверхностным излучением (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser – VCSEL) излучение направлено перпендикулярно p - n -слою (рисунок 5).

Вертикальная структура состоит из ряда слоев p -типа, активной области и ряда слоев n -типа. Сверху и снизу от активной среды расположены слои полупроводников с периодически изменяющейся величиной показателя преломления, которые изготавливаются из комбинации $\text{In} + \text{Ga} + \text{As} + (\text{Al} \text{ или } \text{P})$. Слои выполняют функции лазерных зеркал, и излучение лазера направлено вертикально вверх, то есть перпендикулярно плоскости слоев. Число слоев зависит от желаемой длины волны излучения. Например, комбинация $\text{In} + \text{Ga} + \text{As} + \text{P}$ используется для лазеров с оптическим излучением в окне длин волн 1310–1550 нм.

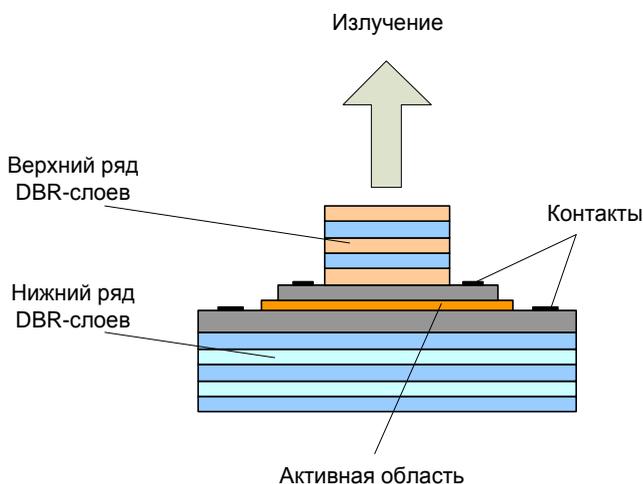


Рисунок 5 – Структура VCSEL-лазеров

Лазеры работают в одномодовом (продольная мода) режиме, используя резонатор исключительно малой длины (порядка 1 мкм), для которого разнесение мод превышает полосу частот усиления. Они излучают свет в направлении, перпендикулярном плоскости активного слоя, аналогично тому, как это делается в СИД с излучающей поверхностью. Работа такого лазера в одномодовом (поперечная мода) режиме может быть реализована путем уменьшения диаметра VCSEL до 2–3 мкм. Выходная мощность и ширина полосы лазеров типа VCSEL, как правило, ниже, чем аналогичные показатели DFB-лазеров.

Важнейшее преимущество VCSEL-лазеров состоит в их технологичности, так как на одном чипе можно разместить матрицу лазеров, каждый из которых может излучать заданную длину волны согласно сетке частот. Еще одним достоинством подобных систем является более простая технология стабилизации параметров, осуществляемая для всех лазеров массива одновременно.

Принципы работы **перестраиваемых лазеров** такие же, как и у лазеров с фиксированной длиной волны генерации. Основными элементами любого лазера являются усилитель и резонатор. В перестраиваемых лазерах применяются те же активные элементы, что и в обычных, поэтому свойства таких лазеров определяются конструкциями используемых перестраиваемых селективных резонаторов.

Перестраиваемые лазеры характеризуются двумя особенностями. Во-первых, спектр усиления их активного вещества должен быть достаточно широким для того, чтобы обеспечить генерацию во всем требуемом диапазоне перестройки. Во-вторых, резонатор лазера должен обладать высокой селективностью для выделения одной длины волны и его конструкция должна обеспечивать возможность перестройки в заданном диапазоне.

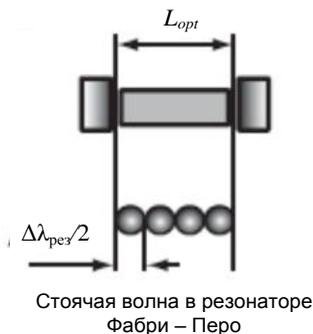


Рисунок 6 – Схема лазера с резонатором Фабри – Перо

Простейший резонатор для создания обратной связи – резонатор Фабри – Перо, образованный двумя плоскопараллельными зеркалами или отражателями любого другого типа (рисунок 6). На длине резонатора L_{opt} расположено целое число q периодов стоячей волны, равных $\lambda_{рез}/2$. В частности, в простейшем полупроводниковом лазере роль отражателей играют торцы активного элемента – полупроводникового кристалла.

Сами отражатели в таких лазерах являются неселективными, поэтому резонансные частоты ν_q определяются резонансными свойствами интерферометра Фабри – Перо:

$$\nu_q = \frac{qc}{2L_{opt}} \quad \text{или} \quad \lambda_q = \frac{2L_{opt}}{q}, \quad (2)$$

где q – целое положительное число;
 L_{opt} – оптическая длина резонатора.

Оптическая длина резонатора с расстоянием между зеркалами L (геометрическая длина), заполненного однородным прозрачным материалом, с показателем преломления n определяется выражением $L_{opt} = nL$.

Частотный интервал $\Delta\nu_{mm}$ между соседними резонансами (межмодовый интервал):

$$\Delta\nu_{mm} = \frac{c}{2L_{opt}} \text{ или } \Delta\lambda_{mm} = \frac{\Delta\nu\lambda_{mdl}}{c}. \quad (3)$$

Только в лазерах с вертикальным резонатором обеспечивается одномодовый режим генерации, так как типичные размеры резонатора имеют величину несколько микрометров.

Перестраиваемый лазер с селектором на основе дифракционной решетки. Широкое применение для перестройки полупроводниковых лазеров нашли селекторы на основе дифракционной решетки, используемой по модифицированной схеме Литтмана-Меткалфа, так как такие селекторы обладают уникальным сочетанием узкополосности фильтра с широким диапазоном перестройки. В лазере с внешним резонатором из-за большой длины резонатора и плотного расположения продольных мод для обеспечения одномодового режима требуется достаточно узкополосный селектор, обеспечивающий необходимый уровень вносимых потерь для нерабочих продольных мод. Механизм селекции частоты лазера с внешним резонатором и комбинированным селектором на основе дифракционной решетки приведен на рисунке 7.

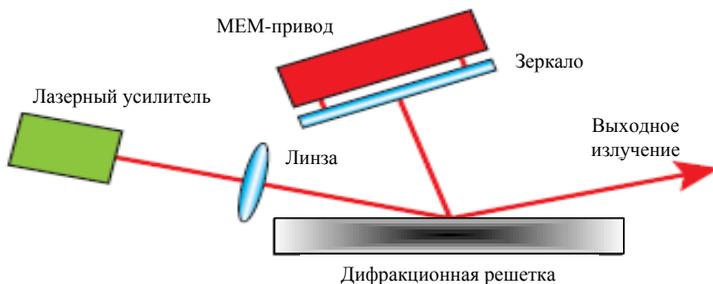


Рисунок 7 – Схема перестраиваемого лазера с селектором на основе дифракционной решетки

Резонатор лазера образован одним из торцов лазерного чипа, дифракционной решеткой и перестраиваемым зеркалом. Дифракционная решетка работает на одном из больших порядков дифракции, что обеспечивает ее высокую дисперсию и, следовательно, селективность. Различные спектральные компоненты отражаются от решетки под разными углами. Генерация осуществляется на той длине волны, для которой дифрагированный на решетке луч пер-

пендикулярен поверхности зеркала. Перестройка частоты достигается изменением наклона зеркала с помощью микроэлектромеханического привода.

Перестраиваемые лазеры с брэгговскими решетками. Активная среда полупроводниковых лазеров представляет собой диэлектрический волновод, ограничивающий световой пучок в поперечном к оптической оси сечении. Для создания перестраиваемых волноводных лазеров необходимо использовать волноводные перестраиваемые селекторы. Роль селекторов играют периодические отражающие структуры с пространственным периодом порядка половины длины световой волны. Такие резонансные периодические структуры используются для создания обратной связи (брэгговские решетки). Они наносятся на поверхность волновода либо вытравливаются в них.

В лазерах с распределенной обратной связью (DFB-лазеры) решетка создается в активной среде. Обратная связь возникает вследствие брэгговского отражения, распределенного равномерно по всей активной области (рисунок 8, *а*). В лазерах с распределенными брэгговскими отражателями (DBR-лазеры) периодические структуры используются в качестве резонансных отражателей, размещенных вне активной среды (рисунок 8, *б*). Поскольку селективно отражающая и активная (усиливающая) области пространственно разделены, такие лазеры предоставляют больше возможностей для управления спектром излучения.

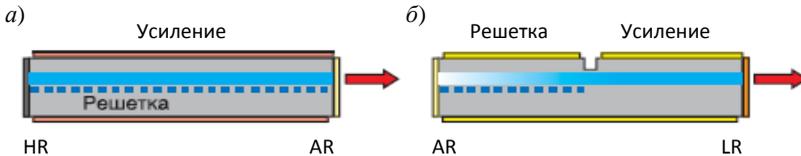


Рисунок 8 – Структурные схемы волноводных лазеров с периодическими структурами (решетками), используемыми для создания обратной связи:
а – DFB-лазер; *б* – DBR-лазер

На основе DFB- или DBR-лазеров можно создавать интегрированные на одной планарной структуре фотонные устройства, включающие в себя перестраиваемый лазер, модулятор и усилитель.

Перестраиваемые лазеры с вертикальными резонаторами. В лазерах с вертикальным резонатором (VCSEL) ось резонатора перпендикулярна плоскости слоев гетероструктуры, выполняющей роль активной усиливающей области. Поперечный размер активного слоя – доли микрометра, поэтому длина резонатора VCSEL тоже очень мала. Благодаря этому, во-первых, обеспечивается селекция одной продольной моды, а во-вторых, перестройка длины волны может быть осуществлена изменением оптической длины резонатора. Наиболее простой способ изменения оптической длины резонатора состоит в механическом перемещении одного из зеркал резонатора.

На рисунке 9 приведен перестраиваемый VCSEL мембранного типа, а на рисунке 10 – VCSEL консольного типа. Перестройка осуществляется перемещением верхнего подвижного зеркала, отделенного от пассивной n -области небольшим воздушным зазором. Перемещение зеркала, как и в других типах микроэлектромеханических устройств, осуществляется электростатическими силами при создании разности потенциалов между перемещающимся зеркалом и верхней частью полупроводниковой гетероструктуры. Для крепления зеркала используются механические устройства консольного или мембранного типа. Область перестройки VCSEL может достигать сотен нанометров и совпадать с шириной полосы усиления активного элемента.

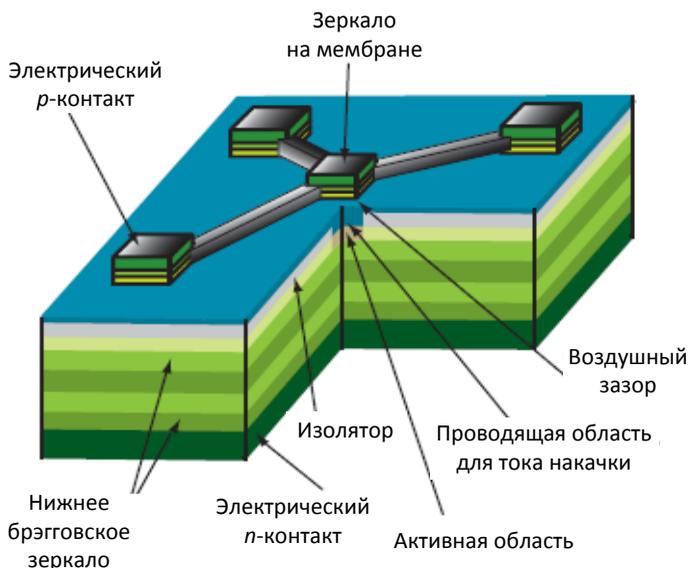


Рисунок 9 – Структурная схема перестраиваемого лазера с вертикальным резонатором мембранного типа (диапазон настройки – 30 нм)

Скорость перестройки и диапазон управляющих напряжений определяются конструкцией подвижного зеркала. Перемещение подвижного зеркала перестраиваемого VCSEL осуществляется за счет изменения электростатического притяжения подвижного зеркала и подстилающей области полупроводника при изменении разности потенциалов между ними. Типичные значения времени перестройки лежат в диапазоне от сотен микросекунд до единиц миллисекунд, включая время срабатывания цепи обратной связи для точной подстройки частоты.

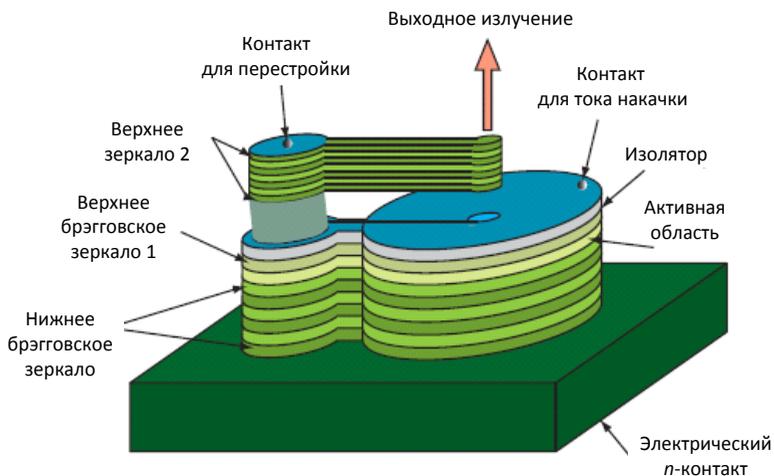


Рисунок 10 – Структурная схема перестраиваемого лазера консольного типа

Диапазон перестройки VCSEL равен минимальному из четырех спектральных диапазонов:

- диапазона перестройки резонатора, определяемого конструкцией крепления перемещаемого зеркала;
- области свободной дисперсии резонатора;
- ширины спектра усиления активного вещества;
- спектра отражения брэгговского зеркала.

Так же, как и в VCSEL с фиксированной длиной волны, в перестраиваемых VCSEL удастся выделить одну поперечную моду с коэффициентом подавления боковых мод более 20 дБ за счет уменьшения апертуры рабочей области до относительно малых размеров. Уменьшение рабочей области ограничивает достижимую выходную мощность, типичные значения которой лежат в диапазоне десятых долей милливатта.

При падении луча света на границу раздела двух сред в общем случае появляются эффекты отражения и преломления волны. Среда, у которой показатель преломления больше, называется оптически более плотной, а вторая – менее плотной. В соответствии с законом Снеллиуса углы падения α , отражения β и преломления γ (рисунок 11) связаны следующими соотношениями:

- закон отражения – $\alpha = \beta$;
- закон преломления – $n_c \sin \alpha = n_o \sin \gamma$.

Если луч переходит из оптически более плотной среды в менее плотную $n_c > n_o$, то $\gamma > \alpha$. Путем увеличения угла падения можно достичь состояния, при котором преломленный луч будет скользить по границе раздела сред, не переходя в другую среду.

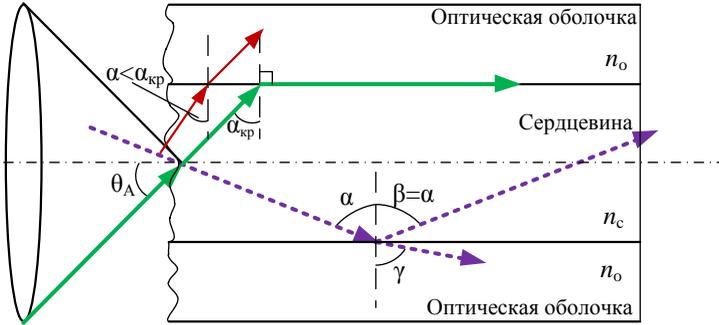


Рисунок 11 – Прохождение луча через границу раздела двух сред

Угол падения, при котором имеет место данный эффект, называется критическим углом $\alpha_{кр}$ полного внутреннего отражения (см. рисунок 11). Для критического угла $\alpha_{кр}$ имеет место следующее отношение:

$$\sin \alpha_{кр} = \frac{n_o}{n_c} \cdot \quad (4)$$

Для всех углов падения, больших критического ($\alpha > \alpha_{кр}$), будут наблюдаться явления полного внутреннего отражения. Вся мощность светового луча практически полностью возвращается в область более плотной среды. На этом эффекте основан принцип передачи оптического излучения по ОБ.

Свет, попадающий на границу под углом меньше критического, будет проникать в оптическую оболочку и затухать по мере распространения в ней. Оптическая оболочка обычно не предназначена для переноса света, и свет в ней достаточно быстро затухает.

Таким образом, для обеспечения условия полного внутреннего отражения при распространении световых лучей необходимо обеспечить ввод излучения в торец ОБ под углом меньше θ_A (см. рисунок 11).

Угол θ_A между оптической осью и одним из лучей, образующих световой конус, для которого в дальнейшем выполняется условие полного внутреннего отражения, носит название апертуры ОБ.

Физически апертура характеризует эффективность ввода оптического излучения в ОБ, а для ее числовой оценки используется понятие числовой апертуры NA

$$NA = \sin \theta_A \cdot \quad (5)$$

Для теоретических расчетов числовой апертуры ступенчатого ОБ используется следующая формула:

$$NA = \sqrt{n_c^2 - n_o^2}. \quad (6)$$

Для практических расчетов числовой апертуры учитывается коэффициент k , который в соответствии со стандартом EIA-455-29 и EIA-455-44 равен 0,98 и 0,94 соответственно:

$$NA = k\sqrt{n_c^2 - n_o^2}. \quad (7)$$

Для градиентных ОВ вводится понятие локальной числовой апертуры, которая показывает, что максимальный угол ввода оптического излучения в этом случае определяется тем, в какой точке сердцевинны ОВ находится вершина конуса, иными словами, захват ОВ вводимого луча света зависит от того, в какой точке сердечника он вводится в градиентное ОВ.

Для градиентного волокна с параболическим профилем показателя преломления локальная числовая апертура определяется выражением

$$NA = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{n_c^2 - n_o^2}. \quad (8)$$

Фактически количество оптической мощности, воспринимаемой ОВ, изменяется пропорционально квадрату NA . Числовая апертура ОВ не зависит от его физических размеров.

Из последнего выражения видно, что с увеличением разности показателей преломления сердечника и оболочки значение NA возрастает и, следовательно, улучшается эффективность ввода излучения в ОВ.

От значения NA зависят эффективность ввода излучения лазера или светодиода в волоконный световод, потери на микроизгибах, дисперсия импульсов, число распространяющихся мод.

Внутреннее отражение служит основой для распространения света вдоль обычного ОВ. Однако при анализе происходящих процессов учитываются только меридианные лучи, проходящие через центральную ось волокна после каждого отражения. Другие лучи, называемые асимметричными, движутся вдоль волокна, не проходя через его центральную ось. Траектория асимметричных лучей представляет собой спираль, накручивающуюся вокруг центральной оси. Асимметричные лучи, как правило, игнорируются в анализе большинства волоконно-оптических процессов.

Если рассматривать показатель преломления n как функцию радиуса r , то используется термин **профиль показателя преломления**. С его помощью описывается радиальное изменение показателя преломления сердечника от оси ОВ в направлении стекла оболочки.

$$n = n(r). \quad (9)$$

Распространение мод в ОВ зависит от распределения профиля показателя преломления.

У ОВ со ступенчатым профилем показатель преломления $n(r) = n_1$ в стекле сердечника остается постоянным. Световоды с параболическим профилем называются градиентными (рисунок 12).

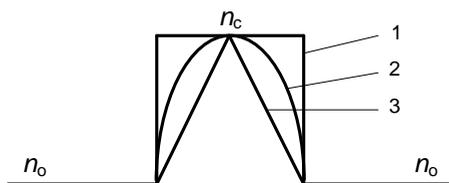


Рисунок 12 – Зависимость формы профиля от показателя степени профиля:

1 – ступенчатый профиль ($g \rightarrow \infty$); 2 – параболический профиль ($g = 2$);

3 – треугольный профиль ($g = 1$)

Другой важной величиной для описания волоконного световода является структурный параметр, или нормированная частота V :

$$V = \frac{\pi d}{\lambda} \cdot NA, \quad (10)$$

где d – диаметр сердечника;

λ – длина волны;

NA – числовая апертура.

В случае, если рассчитанное значение $V < 2,405$ (для ступенчатого профиля) или $V < 3,53$ (для параболического профиля), возможно распространение единственной моды. Величина 2,405 равна функции Бесселя $I_0(x)$ при ее первом нулевом значении. Кривые функций Бесселя $I_n(x)$ выглядят как затухающие синусоидальные колебания. Это математическая функция для описания электрического поля в цилиндрических волноводах, таких как волоконные световоды. Минимальная длина волны, при которой в волокне распространяется фундаментальная мода, называется длиной волны отсечки, значение которой легко определяется из условия одномодовости. Для ступенчатого профиля минимальная длина волны

$$\lambda_{\text{мин}} = \frac{\pi d}{2,405} \cdot NA. \quad (11)$$

Минимальная длина волны для параболического профиля

$$\lambda_{\text{мин}} = \frac{\pi d}{3,53} \cdot NA. \quad (12)$$

В случае, если рассчитанное значение $V > 2,405$ (для ступенчатого профиля) или $V > 3,53$ (для параболического профиля), возможно распространение

нескольких мод. Тогда значение нормированной частоты округляется до большего целого числа и минимальная длина волны определяется:

$$\lambda_{\text{мин}} = \frac{\pi d}{V} \cdot NA. \quad (13)$$

Оценить частоту можно при помощи формулы:

$$\lambda_{\text{мин}} = \frac{c}{f_{\text{мин}}}, \quad (14)$$

где c – скорость света в вакууме, $c = 2,9979 \cdot 10^8$ м/с,
 $f_{\text{мин}}$ – частота, Гц.

При стыковке одномодовых ОВ между собой важную роль играет диаметр модового поля, который более точно оценивает размеры поперечного распределения энергии основной моды. В многомодовых ОВ размер сердцевинны принято оценивать ее диаметром, однако в одномодовых волокнах применяется понятие диаметра модового поля. Это связано с тем, что энергия основной моды в ОВ распространяется не только в сердцевине, но и частично в оболочке, захватывая ее приграничную область.

Радиус поля моды W , мкм, определяется следующим соотношением:

$$W = r \left(0,65 + 1,62V^{-\frac{3}{2}} \right), \quad (15)$$

где r – радиус сердцевинны ОВ, мкм.

Диаметр модового поля

$$D = 2W. \quad (16)$$

В случае если $V > 2,405$ или $V > 3,53$, рассчитывается количество мод N , распространяемых в сердечнике, для любого профиля показателя преломления, описываемого по степенному закону

$$N \approx \frac{V^2}{2} \left(\frac{g}{g+2} \right), \quad (17)$$

где g – показатель степени профиля;

V – нормированная частота.

В лабораторной работе исследуется эффективность ввода когерентного излучения с помощью линзы в многомодовое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления. Излучение лазера с диаметром пучка a вводится в волокно с помощью линзы с фокусным расстоянием F . Представим фокальное пятно, формируемое этой линзой, как вторичный источник, излу-

чающий с постоянной мощностью в пределах конуса излучения с углом при вершине θ (угол между осью конуса и крайним лучом) (рисунок 13).

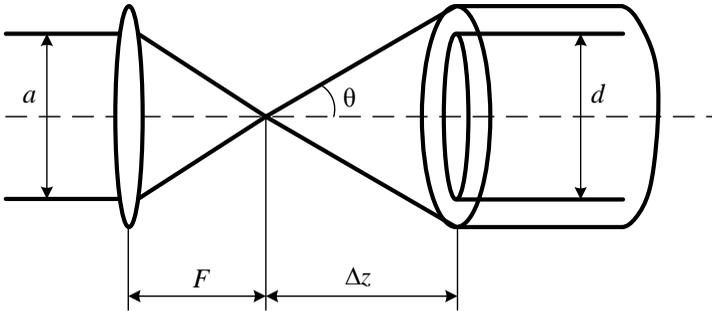


Рисунок 13 – Ввод излучения в оптоволокно

Угол θ , как видно из рисунка 13, зависит от фокусного расстояния и диаметра пучка по закону:

$$\theta = \arctg\left(\frac{a}{2F}\right). \quad (18)$$

Если оси светового конуса и оптического волокна совпадают, а фокальное пятно смещено на расстояние Δz относительно входного торца световода, то в плоскости входного торца источником будет освещаться круг диаметром a .

Однако следует иметь в виду, что количество введенной в волокно оптической мощности существенно зависит от числовой апертуры волокна NA .

Световод захватывает только те лучи, которые заключены внутри конуса с максимальным углом θ_A , определяемым полным внутренним отражением на границе сердечник – оболочка. Поэтому для ввода в волоконный световод всей оптической мощности излучателя (без учета потерь на отражение) должно выполняться условие $\theta < \theta_A$.

Подставив в условие $\theta < \theta_A$ выражение для θ и θ_A из (5) и (18), получаем условие максимальной эффективности возбуждения световода:

$$\arctg\left(\frac{a}{2F}\right) < \arcsin(NA). \quad (19)$$

Эффективностью ввода η называют отношение оптической мощности излучения, введенной в световод $P_{ов}$, к оптической мощности источника излучения $P_{и}$:

$$\eta = \frac{P_{ов}}{P_{и}}. \quad (20)$$

Эффективность ввода находится в пределах $0 \leq \eta \leq 1$.

Из рисунка 13 следует, что источником излучения является вторичный источник, мощности которого $P_{и}$ соответствует максимальное напряжение на выходе фотоприемника U_{\max} . Величина мощности $P_{об}$ зависит от осевого смещения Δz , поперечного и углового смещений источника света. Этой мощности соответствует напряжение U на выходе фотоприемника. Таким образом, эффективности η будет соответствовать эффективность выражению:

$$\eta = \frac{P}{P_{\max}} = \left(\frac{U}{U_{\max}} \right)^2. \quad (21)$$

Для определения эффективности ввода излучения, в зависимости от смещения Δz , используют выражение:

$$\eta = \frac{d^2}{4 \cdot (\Delta z)^2 \cdot \text{tg}^2 \theta}. \quad (22)$$

Порядок выполнения работы

1 Изучите краткие сведения из теории и ответьте на контрольный вопрос, заданный преподавателем.

2 Выберите и запишите исходные данные для расчета из таблицы 1 в соответствии с заданным вариантом.

3 Используя формулы (4)–(8), определите критические углы. Изобразите рисунок 11 и отметьте на нем рассчитанные значения углов.

4 Используя выражения (10)–(17), определите нормированную частоту, минимальную длину волны, частоту, радиус и диаметр модового поля, количество мод. Результаты расчета сведите в таблицу 2.

Таблица 1 – Исходные данные

Номер варианта	Рабочая длина волны λ , мкм	Диаметр сердцевины d , мкм	k	n_c	n_o	Профиль показателя преломления	F , мкм	a , мкм
1	1,31	8,3	0,98	1,468	1,462	С*	90	20
2	1,55	62,5		1,464	1,457	П	150	30
3	1,31	50,0		3,600	3,550	П	200	100
4	1,55	50,0		1,464	1,457	П	150	30
5	1,31	8,7	0,98	1,467	1,460	С	110	30
6	1,55	8,8	0,94	3,580	3,450	С	200	150
7	1,31	8,5	0,94	1,469	1,463	С	100	20
8	1,55	62,5		1,470	1,439	П	150	50
9	1,31	50,0		1,460	1,442	П	200	50

Окончание таблицы 1

Номер варианта	Рабочая длина волны λ , мкм	Диаметр сердцевины d , мкм	k	n_c	n_o	Профиль показателя преломления	F , мкм	a , мкм
10	1,55	8,3	0,94	1,468	1,463	С	110	20
11	1,31	8,0	0,98	1,500	1,495	С	300	50
12	1,55	50,0		1,474	1,468	П	150	20
13	1,31	50,0		1,450	1,449	П	300	20
14	1,55	50,0		1,493	1,450	П	300	20

* С – ступенчатый, П – параболический профиль показателя преломления

5 С помощью выражения (18) определите угол ввода оптического излучения в волокно. Используя выражение (22), постройте график зависимости $\eta(\Delta z)$ и по нему определите оптимальное смещение и эффективность ввода. Изобразите рисунок 13 и отметьте на нем рассчитанные значения.

6 Сделайте вывод по результатам расчета.

Таблица 2 – Результаты расчета

Номер варианта	
Значение критического угла $\alpha_{кр}$, град	
Угол полного отражения θ_d , град	
Нормированная частота V	
Минимальная длина волны $\lambda_{мин}$, мкм	
Диаметр модового поля D , мкм	
Количество мод N	
Угол ввода оптического излучения θ , град	

Содержание отчета

- 1 Ответ на контрольный вопрос.
- 2 Исходные данные для выполнения расчета.
- 3 Подробные расчеты.
- 4 График зависимости $\eta(\Delta z)$.
- 5 Рисунок с отмеченными на нем рассчитанными значениями.
- 6 Вывод.

Контрольные вопросы

- 1 Отличие передатчиков с прямой и внешней модуляцией.
- 2 Виды источников излучения и их отличия.
- 3 Принцип действия лазера с резонатором Фабри-Перо.
- 4 Лазер с распределенной обратной связью.
- 5 Лазер с распределенными брэгговскими отражателями.
- 6 Лазер с вертикальным резонатором и поверхностным излучением.
- 7 Особенности перестраиваемых лазеров.
- 8 Перестраиваемый лазер с селектором на основе дифракционной решетки.

- 9 Перестраиваемые лазеры с брэгговскими решетками.
- 10 Перестраиваемые лазеры с вертикальными резонаторами мембранного типа.
- 11 VCSEL консольного типа.
- 12 Понятие апертуры оптического волокна.
- 13 Профили показателя преломления.
- 14 Эффективность ввода излучения в оптическое волокно.

Лабораторная работа №3

ИЗУЧЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: приобрести практические навыки оценки качества передачи по каналам цифровых систем путем расчета и последующего анализа глаз-диаграммы цифровых сигналов на выходе фотоприемного устройства волоконно-оптической системы передачи.

Краткие сведения из теории

Приемные оптические модули (ПРОМ) являются важными элементами ВОСП, предназначенными для преобразования оптического сигнала, принятого из волокна, в электрический, который обрабатывается далее электронными устройствами.

Основными элементами ПРОМ являются фотодетектор, преобразующий полученный оптический сигнал в электрический, и каскад электрических усилителей, усиливающих сигнал и преобразующих его в форму, пригодную для обработки.

Фотодетектор, как и источник оптического излучения, должен отвечать определенным требованиям: обладать высокой чувствительностью и быстродействием, вносить минимальные шумы в приемную систему, отличаться стабильностью рабочих характеристик, иметь небольшие размеры, быть высоконадежным и недорогим.

Среди полупроводниковых фотодетекторов наибольшее применение в ВОСП получили PIN-фотодиоды и лавинные фотодиоды. В основе работы фотодетектора лежит явление внутреннего фотоэффекта, при котором в результате поглощения фотонов с энергией, превышающей энергию запрещенной зоны, происходит переход электронов из валентной зоны в зону проводимости (генерация электронно-дырочных пар). Если к полупроводнику приложить напряжение, то появится электрический ток, обусловленный движением электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне.

Эффективная регистрация генерируемых в полупроводнике электронно-дырочных пар обеспечивается путем разделения носителей заряда. Для этого используется полупроводниковая конструкция с *p-n*-переходом, которая называется фотодиодом.

PIN-фотодиоды. Наиболее распространены фотодетекторы на основе **кремниевых** и **InGaAs PIN-фотодиодов**. Пик чувствительности кремниевых фотодиодов находится в районе длины волны 900 нм, фотодиоды типа InGaAs имеют наибольшую чувствительность в диапазоне длин волн 1300–1500 нм.

Отличительной особенностью *PIN-фотодиода* является наличие *i*-слоя (слабелегированного полупроводника *n*-типа) между слоями *p*- и *n*-типа (рисунк 1).

Такой *i*-слой называется обедненным, поскольку в нем нет свободных носителей. Сильное легирование крайних слоев делает их проводящими, поэтому все напряжение падает на *i*-слой и в нем создается максимальное значение электрического поля. Но поскольку в *i*-слое нет свободных носителей, то в нем нет и электрического тока.

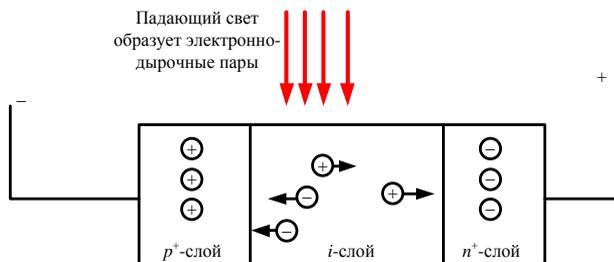


Рисунок 1 – Схема структуры *p-i-n*-фотодиода

При наличии падающего на *i*-слой излучения в нем образуются свободные электронно-дырочные пары, которые под воздействием электрического поля быстро разделяются и двигаются в противоположных направлениях к своим электродам, образуя электрический ток. Электрический ток идет до тех пор, пока образуются электронно-дырочные пары, то есть пока на фотодиод падает свет. Эффективным является взаимодействие излучения только с *i*-слоем, поэтому его делают протяженным, а крайние слои – узкими.

На рисунке 2 показано поперечное сечение *кремниевого фотодиода*. Его основным материалом является кремний *n*-типа. Фотодиодные переходы, по сравнению с обычными *p-n*-переходами, необычны тем, что верхний слой *p*-типа очень тонок. Кремний имеет обедненный слой электрических зарядов вблизи *p-n*-перехода. Прикладывая обратное напряжение смещения на такой переход, можно изменять глубину обедненного слоя, и, как следствие, емкость обедненного слоя. С увеличением степени обеднения эта емкость уменьшается до тех пор, пока не будет достигнуто состояние полного обеднения. Обедненный слой особенно важен для характеристик фотодиода благодаря тому, что он в большей степени определяет чувствительность к световому излучению.

Пары электрон-дырка формируются, когда свет поглощается в активной области. В ней электроны отделяются и проходят в область *n*-типа, а дырки –

в область p -типа. Это приводит к возникновению тока, генерируемого падающим светом. Такая миграция электронов и дырок в области их предпочтения называется фотогальваническим эффектом. Генерируемый ток, обычно определяемый как ток короткого замыкания, линейно зависит от света, излучаемого на активную область. Этот ток может изменяться в достаточно широком диапазоне.

На рисунке 3 приведена обобщенная схема фотодетектора на основе InGaAs. Так как ширина запрещенной зоны для InP равна 1,35 эВ, p -слой и n -слой прозрачны для света с длиной волны более 0,92 мкм. Ширина запрещенной зоны для i -слоя, состоящего из материала InGaAs, равна 0,75 эВ. Эта величина соответствует длине волны отсечки 1650 нм. Следовательно, средний слой из материала InGaAs поглощает длины волн в области 1300–1600 нм.

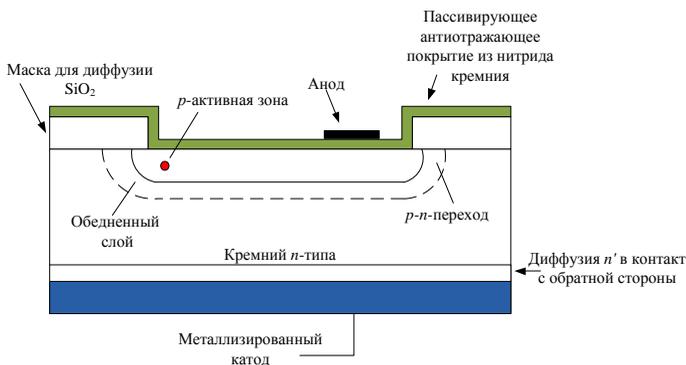


Рисунок 2 – Поперечное сечение кремниевого фотодиода

Этот тип PIN-фотодиодов имеет очень хорошие характеристики во втором и третьем окнах прозрачности.

Детекторы на основе лавинных фотодиодов (Avalanche Photo Diode – APD) представляют из себя PIN-диоды с усилением благодаря лавинному умножению в обратном смещенном p - n -переходе, за счет которого повышается его квантовая эффективность. На рисунке 4 схематически представлено поперечное сечение типичной структуры APD, сочетающей преимущества лавинного и PIN-фотодиода.

На рисунке 4 показаны зоны поглощения и умножения. Поперек зоны приложено электрическое поле, которое разделяет фотогенерируемые дырки и электроны и забрасывает один тип носителей в зону умножения. Эта зона умножения представляет собой область высокой электрической напряженности, способной обеспечить усиление внутреннему фототоку за счет ударной ионизации. Кроме того, способность данного поля к умножению носителей должна позволить достичь эффективного усиления и при напряженности поля ниже напряжения пробоя для данного диода.

Требование высоких значений внутреннего усиления накладывает достаточно жесткие ограничения на качество и однородность полупроводникового материала, поскольку коэффициент умножения экспоненциально сильно зависит от напряженности электрического поля.

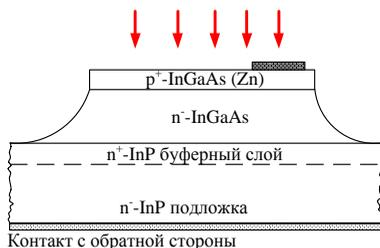


Рисунок 3 – Обобщенная схема PIN-фотодиода на основе InGaAs

Лавинному фотодиоду требуется снабжение стабильным высоким напряжением и более сложная схема смещения, что повышает стоимость и снижает надежность. Из этого следует, что PIN-фотодиоды обычно являются более предпочтительными устройствами для нормального использования. У лавинных диодов чувствительность повышена от 5 до 10 дБ, а время ответа снижено вдвое по сравнению со стандартными PIN-фотодиодами.

Такие лавинные диоды необходимы, когда у системы большие потери и она должна работать при низких отношениях уровня сигнал/шум, как в линиях связи на больших расстояниях. В таких системах экономия за счет дополнительных повторителей перевешивает недостатки.

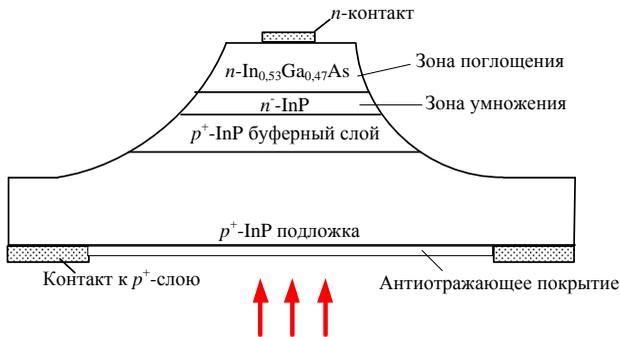


Рисунок 4 – Поперечное сечение типичной гетероструктуры лавинного фотодиода

Глаз-диаграммы применяются для оценки параметров цифровых сигналов как при проведении лабораторных (системных) измерений, так и эксплуатационных.

По своей структуре глаз-диаграммы являются модификацией осциллограмм и отличаются от последних тем, что используют периодическую структуру цифрового сигнала.

Для построения двухуровневой глаз-диаграммы битовый поток подается на осциллограф, в то время как синхронизация внешней развертки производится от битового потока с частотой f .

В случае построения многоуровневых диаграмм сигнал должен проходить через многоуровневый конвертер, а синхронизация производится от символьного потока с частотой f_s .

Для калибровки глаз-диаграммы сигнал подают непосредственно на вход осциллографа. В этом случае глаз-диаграмма имеет вид прямоугольника.

Фильтр (тестируемая система), ограничивающий полосу передаваемого сигнала, вносит существенные изменения в форму импульса, в результате диаграмма приобретает форму «глаза». Глаз-диаграммы используют периодическую структуру цифрового сигнала.

За счет внешней синхронизации развертки получаемые осциллограммы волнового фронта накладываются друг на друга с периодом одного отсчета.

В результате проведения измерений с накоплением получается глаз-диаграмма (рисунок 5), при этом по оси ординат откладывается амплитуда сигналов, по оси абсцисс – время.



Рисунок 5 – Идентификация глаз-диаграммы

Реальная осциллограмма сигнала «разрезается» посимвольно в соответствии с тактовыми импульсами синхронизирующего генератора, а затем глаз-диаграмма «складывается» из полученных кусков.

В идеальном случае при отсутствии цепей фильтрации в результате такого сложения получится квадрат («квадратный глаз»).

Однако глаз-диаграмма реального сигнала будет значительно отличаться от квадрата, поскольку будет содержать в себе составляющие нарастания

фронта сигнала и спада фронта; прямоугольный импульс будет иметь форму колокола.

Исследование глаз-диаграмм позволяет провести детальный анализ цифрового сигнала по параметрам, непосредственно связанным с формой волнового фронта: параметра межсимвольной интерференции, передачи данных, синхронизации и других характеристик.

Глаз-диаграмма представляет собой результат многократного наложения битовых последовательностей с выхода генератора, отображаемый на экране осциллографа в виде диаграммы распределения амплитуды сигнала по времени (рисунок 6).

Эффекты уширения импульса, а также фазовое дрожание сигнала вызывают появление взаимных искажений между символами, что приводит к пересечению глаз-диаграммы с временной осью в разные промежутки времени. Максимальная ширина области пересечения с временной осью определяется как пиковое фазовое дрожание, или джиттер передачи данных T_j . Джиттер измеряется обычно в единицах времени или как отношение к интервалу передачи символа T_j/T_s .

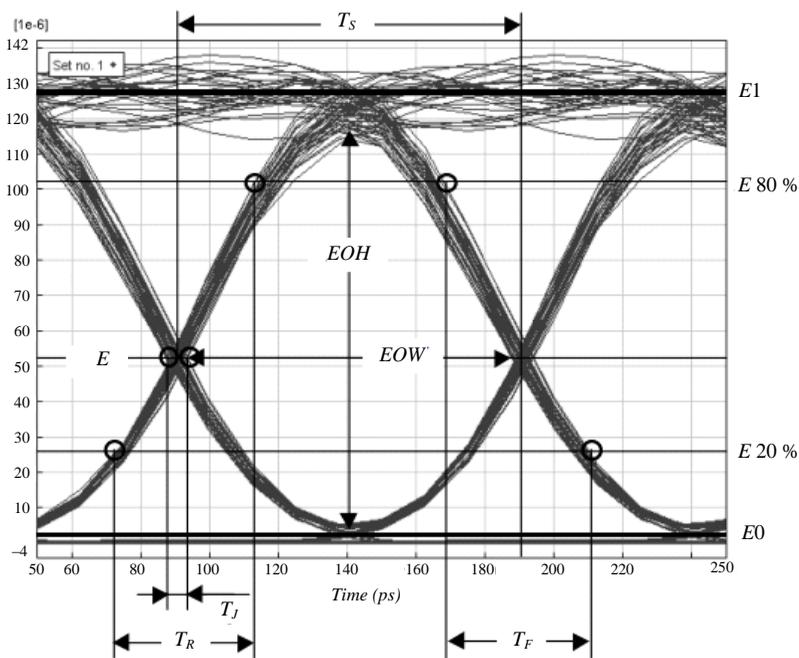


Рисунок 6 – Глаз-диаграмма на экране осциллографа

Эффекты уширения импульса, а также фазовое дрожание сигнала вызывают появление взаимных искажений между символами, что приводит к пересечению глаз-диаграммы с временной осью в разные промежутки времени.

Суммарные потери оптического волокна (ОВ) на заданном участке A складываются из собственных потерь ОВ и потерь в неразъемных соединениях:

$$A = \alpha L + \alpha_n N_n + \alpha_p N_p, \text{ дБ}, \quad (1)$$

где α – коэффициент затухания ОВ на рабочей длине волны λ , дБ/км;

L – заданная протяженность кабельного участка, км;

α_n – максимальное значение потерь в неразъемном соединении на заданной рабочей длине волны λ . Для 1310 нм $\alpha_n = 0,2$ дБ, для 1550 нм $\alpha_n = 0,1$ дБ;

α_p – потери мощности сигнала в разъемных соединениях, предполагая использование оптических разъемов типа FC/PC ($\alpha_p = 0,5$ дБ);

N_p – количество разъемных соединений на участке ($N_p = 4$, т. е. по два разъемных соединения на приеме и передаче, в том числе по одному на оптическом кроссе и на приемопередающем модуле оптической системы передачи);

N_n – количество неразъемных соединений

$$N_n = \frac{L}{L_c} - 1, \quad (2)$$

где L_c – строительная длина оптического кабеля, обычно составляет 2–6 км.

Дисперсией ОВ называют увеличение длительности оптических импульсов при их распространении по ОВ. Неодинаковая скорость распространения отдельных составляющих оптического сигнала является основной причиной дисперсии. Одномодовые ОВ характеризуются хроматической и поляризационной модовой дисперсией (ПМД). Дисперсия ОВ создает переходные помехи, приводит к межсимвольным искажениям и, как следствие, ограничивает скорость передачи в линии.

Данный фактор искажения учитывается путем расчета дополнительных потерь (приращения уровня помех) из-за шумов межсимвольной интерференции (ISI – Intersymbol Interference), которые включают в себя перекрестные помехи и шумы синхронизации. Потери из-за межсимвольной интерференции α_{ISI} , дБ, определяются из следующего выражения:

$$\alpha_{ISI} = 10 \lg \left(\frac{1}{1 - 1,425 \cdot \exp\left(-1,28 \frac{T_0}{T_L}\right)} \right), \quad (3)$$

где T_0 – время нарастания фронта оптического импульса на выходе источника оптического излучения от 10 до 90 % его максимального зна-

чения, с; непосредственно связано со скоростью передачи оптического сигнала в линии:

$$T_0 = \frac{0,48}{B_L}, \quad (4)$$

B_L – скорость передачи оптического сигнала в линии, бит/с.

В данной работе рассматривается применение блочного линейного кода оптического сигнала *МВМВ*, где M – число символов кодовой последовательности, а N – число импульсов, необходимое для передачи:

$$B_L = \frac{N}{M} B, \quad (5)$$

где B – скорость передачи информации, соответствующая заданному уровню цифровой иерархии, бит/с (таблица 1);

T_L – время нарастания фронта оптического импульса на выходе фотоприемника ОСП от 10 до 90 % его максимального значения, с,

$$T_L = \sqrt{T_0^2 + \left(\frac{0,35}{B_L}\right)^2 + \sigma^2}, \quad (6)$$

где σ – прогнозируемое среднеквадратическое значение дисперсии на кабельный участок

$$\sigma = \sqrt{D_{ch}^2 + D_{PMD}^2}, \quad (7)$$

D_{ch} и D_{PMD} – значения хроматической и поляризационной модовой дисперсий на участке соответственно, с.

Таблица 1 – Уровни плезиахронной и синхронной цифровых иерархий

Уровень цифровой иерархии	Поток	Скорость передачи информации B , Мбит/с	Тип линейного кода
Плезиахронная цифровая иерархия (PDH)	E1	2,048	1B2B
	E2	8,448	
	E3	34,368	
Синхронная цифровая иерархия (SDH)	STM-1	155,520	10B11B

Прогнозируемое значение хроматической дисперсии (D_{ch}) на участке заданной протяженности (L) определяется по следующей формуле:

$$D_{ch} = D\Delta\lambda L, \quad (8)$$

где D – коэффициент хроматической дисперсии на заданной рабочей длине волны (λ), пс/(нм·км);

$$D = \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right], \quad (9)$$

где S_0 – параметр наклона спектральной характеристики дисперсии ОВ в точке нулевой дисперсии, с/(нм²·км);

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

λ_0 – длина волны нулевой дисперсии, нм.

Прогнозируемое значение ПМД на ЭКУ заданной протяженности

$$D_{PMD} = PMD\sqrt{L}. \quad (10)$$

где PMD – параметр ПМД волокна, пс/ $\sqrt{\text{км}}$.

Уровень мощности на выходе источника оптического излучения, дБ

$$p_0 = 10 \cdot \lg \frac{P_0}{10^{-3}}, \quad (11)$$

где P_0 – мощность на выходе источника оптического излучения, Вт.

Уровень мощности оптического сигнала на выходе фотоприемника ОСП определяется суммарными потерями в ОВ на участке ВОЛС, а также суммарным значением дополнительных потерь, обусловленных дисперсией ОВ:

$$p_L = p_0 - A - \alpha_{ISI}. \quad (12)$$

Мощность оптического сигнала на выходе фотоприемника

$$P_L = 10^{(0,1p_L-3)}, \quad (13)$$

где p_L – уровень мощности оптического сигнала на выходе фотоприемника, дБ.

Для расчета помехозащищенности цифрового канала необходимо вычислить уровень мощности оптического шума, создаваемого фотоприемником p_{noise} .

Фотоприемные устройства высокоскоростных ВОСП проектируются таким образом, чтобы логарифм отношения полосы пропускания электрического фильтра к полосе пропускания оптического фильтра составлял не менее 2 дБ. С учетом вышесказанного, максимальный уровень мощности шума фотоприемника, дБ,

$$p_{noise} = p_R - 20 \cdot \lg(Q) - 2, \quad (14)$$

где p_R – заданный уровень чувствительности фотоприемника, дБ;

$Q_{ном}$ – номинальное значение Q -фактора, соответствующее нормированному коэффициенту ошибок $BER_{ном}$ в цифровом канале связи (таблица 2).

Очевидно, чувствительность фотоприемника P_R и мощность шума P_{noise} рассчитываются как

$$P_R = 10^{(0,1 P_R^{-3})}, \quad (15)$$

$$P_{noise} = 10^{(0,1 P_{noise}^{-3})}. \quad (16)$$

Таблица 2 – Соответствие допустимых значений коэффициента битовых ошибок ($BER_{ном}$) и номинальных значений Q -фактора ($Q_{ном}$)

Стандарт	E1, E2, E3	STM-1	STM-4
$BER_{ном}$	10^{-9}	10^{-10}	10^{-12}
$Q_{ном}$	5,99	6,63	7,04

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

$$P_{out}^0(t) = P_L \left\{ 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{t+T}{s_L \sqrt{2}} \right] + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{t}{s_L \sqrt{2}} \right] \right\} \quad (17)$$

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

$$P_{out}^1(t) = P_L \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{t+T}{s_L \sqrt{2}} \right] - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{t}{s_L \sqrt{2}} \right] \right\}, \quad (18)$$

где erf – вспомогательная функция интеграла ошибок

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy;$$

s_L – среднеквадратическая длительность гауссова импульса на выходе фотоприемника ОСП; данная величина непосредственно связана с T_L следующим соотношением:

$$s_L = \frac{T_L}{2,563}; \quad (19)$$

T – интервал передачи битовой последовательности, с:

$$T = N_{symp} \tau_{05}, \quad (20)$$

N_{symp} – количество символов битовой последовательности ($N_{symp} = 3$);

τ_{05} – длительность импульса на уровне 0,5 от его максимума на выходе источника оптического излучения, обратно пропорциональна скорости передачи сигнала в линии:

$$\tau_{05} = \frac{1}{B_L}. \quad (21)$$

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 системы передачи. 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 электрическом уровне, а именно – непосредственно по глаз-диаграмме. 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» определяется точка максимального раскрытия глаз-диаграммы:

$$\tau_{open} = \ln \left[\frac{1}{\sqrt{\exp\left(\frac{T^2}{s_L^2}\right)}} \right] \frac{s_L^2}{T}. \quad (22)$$

Значения, соответствующие минимальной зарегистрированной мощности при передаче логической «1» $P1_{min}$ и максимальной зарегистрированной мощности при передаче логического «0» $P0_{max}$ рассчитываются по следующим формулам:

$$P1_{min} = P_{out}^1(\tau_{open}), \quad (23)$$

$$P0_{max} = P_{out}^0(\tau_{open}). \quad (24)$$

Исходя из предположения Гауссова распределения состояний логической «1» и логического «0», определите характеристики распределений состояний:

– математическое ожидание $E1$ и $E0$

$$E1 = \begin{cases} P_L, P_L \geq P_R, \\ P_R, P_L < P_R, \end{cases} \quad (25)$$

$$E0 = P_{noise}; \quad (26)$$

– среднеквадратическое отклонение σ_1 и σ_0

$$\sigma_1 = \frac{E1 - P1_{\min}}{3}, \quad (27)$$

$$\sigma_0 = \begin{cases} \frac{E0 + P0_{\max}}{3}, E0 \leq P0_{\max} \\ \frac{E0 - P0_{\max}}{3}, E0 > P0_{\max} \end{cases}; \quad (28)$$

– Q -фактор

$$Q = \frac{|E1 - E0|}{\sigma_1 + \sigma_0}. \quad (29)$$

При этом сам коэффициент ошибок BER определяется по следующей формуле:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right), \quad (30)$$

где $\operatorname{erfc}(x)$ – вспомогательная функция интеграла ошибок:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y^2} dy. \quad (31)$$

В случае если $(Q/\sqrt{2}) > 3$, то можно использовать приближенную формулу расчета BER :

$$BER = \frac{1}{Q\sqrt{2}} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right). \quad (32)$$

Порядок выполнения работы

1 Изучите краткие сведения из теории и ответьте на контрольный вопрос, заданный преподавателем.

2 Выберите и запишите исходные данные для расчета из таблицы 3 в соответствии с заданным вариантом. Из таблиц в приложении А выпишите параметры для заданных типов приемника, источника и оптического кабеля.

3 Используя формулы (1)–(2), рассчитайте суммарные потери в ОВ на заданном участке.

4 Определите значения дисперсии на заданном участке с помощью формул (3)–(10).

Таблица 3 – Исходные данные

Вариант	Длина кабельного участка L , км	Рабочая длина волны λ , нм	Тип источника	Ширина спектра излучения источника $\Delta\lambda$, нм	Тип приемника	Марка ОВ	Уровень цифровой иерархии
1	110	1310	ЛД-1300-10	2	ATAV2400	Hitachi cable G.652	E1
2	120	1550	ЛД-1550-5	4	PP-10G	OFS MC-SM 332	E2
3	130	1310	ЛД-1300-20	3	MDRI	Alcatel 6901	E3
4	100	1550	ЛД-1550-20	5	DRP2S	Corning SMF-28	STM-1
5	100	1310	ПОМ-470	10	PROM-50	Alcatel 6900	STM-1
6	150	1550	ТСД-1500	8	PROM-34	Corning SMF-28e	E1
7	160	1310	ЛД-1300-5	1,5	DRP2 43	YOFC 268WY	E2
8	200	1550	ЛД-1550-30	2	ППОМ-367	Pure-Band	E3
9	190	1310	ПОМ-460M	8	PTAV2400	Sumitomo Electric G.652	STM-1
10	140	1550	ЛД-1550-10	1	ППОМ-367	SF-SMF-x	E1
11	100	1310	ТСД-1300	7	ППОМ-364	OFS MC-SM 332	E2
12	120	1550	ТСД-1500	5	PROM-155	Alcatel 6900	E3
13	170	1310	ИЛПН-360	1	MD(C)RL	Alcatel 6901	E1
14	120	1550	ЛД-1550-20	3	PTAV155C	Hitachi cable G.652	STM-1

5 Рассчитайте параметры глаз-диаграммы по формулам (11)–(21) и выполните ее построение 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).

6 Определите показатели качества канала цифровой передачи по формулам (22)–(32). Результаты расчета сведите в таблицу 4.

7 Сделайте вывод по результатам расчета.

Таблица 4 – Результаты расчета

Номер варианта	
Суммарные потери $OB A$, дБ	
Среднеквадратическое значение дисперсии σ , с	
Потери из-за межсимвольной интерференции α_{ISI} , дБ	
Мощность оптического сигнала на выходе фотоприемника P_L , мВт	
Мощность шума P_{noise} , мВт	
Среднеквадратическая длительность гауссова импульса на выходе фотоприемника ОСП s_L , с	
Значение точки максимального раскрыва глаз-диаграммы τ_{open} , с	
Среднеквадратическое отклонение σ_1 и σ_0 , мВт	
Q -фактор	
Коэффициент ошибок BER	

Содержание отчета

- 1 Ответ на контрольный вопрос.
- 2 Исходные данные для выполнения расчета.
- 3 Подробные расчеты.
- 4 Глаз-диаграмма.
- 5 Вывод.

Контрольные вопросы

- 1 Джиттер.
- 2 Принцип действия PIN -фотодиодов.
- 3 Назначение глаз-диаграммы.
- 4 Отличие кремниевых фотодиодов.
- 5 Потери из-за межсимвольной интерференции.
- 6 Структура PIN -фотодиода на основе InGaAs.
- 7 Отличия лавинных фотодиодов.
- 8 Дисперсия.
- 9 Принцип действия лавинных фотодиодов.
- 10 Структура PIN -фотодиодов.
- 11 Параметры глаз-диаграммы.
- 12 Назначение фотодетекторов и требования к ним.
- 13 Структура лавинных фотодиодов.
- 14 Структура кремниевых фотодиодов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Цель работы: изучить принципы построения сетей Ethernet, FDDI и ATM, FastEthernet, научиться моделировать сети передачи данных для предприятия на основе указанных технологий.

Краткие сведения из теории

Ethernet – наиболее популярное во всем мире семейство стандартов для локальных сетей, которое охватывает физический и канальный уровень модели OSI. Стандарты Ethernet отличаются поддерживаемой скоростью. Широко распространены сегодня скорости 10, 100 Мбит/с, 1, 10, 100 Гбит/с. Различные варианты технологии также отличаются типом используемой среды передачи данных, например, в наиболее популярных стандартах Ethernet используется недорогой тип кабеля, а именно – неэкранированная витая пара (Unshielded Twisted-Pair – UTP), в то время как в других – более дорогой волоконно-оптический кабель. Использование волоконно-оптического кабеля оправдано в том случае, если необходимо подключить устройства, которые находятся на большом расстоянии друг от друга. Или в случае повышенных требований к безопасности сети.

Ethernet использует алгоритм CSMA/CD (от англ. *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection* – множественный доступ с контролем несущей и обнаружением конфликтов) для прослушивания линии, распознавания коллизии и прерывания передачи. CSMA/CD является «светофором» технологии Ethernet и служит для предотвращения беспорядочных столкновений кадров в сети.

Технология Ethernet использует общую среду передачи, поэтому все устройства локальной сети Ethernet получают все сообщения, а затем проверяют, совпадает ли адрес назначения с собственным адресом устройства. Если адреса совпадают, то сообщение принимается, в противном случае сообщение отбрасывается.

Реализация коммутируемой архитектуры сети Ethernet имеет преимущество в том, что линии, связывающие коммутатор с устройствами, подключенными к сети, получают полосу пропускания максимальной ширины. Это объясняется тем, что передаваемые пакеты не отправляются широковещанием ко всем устройствам сети, а передаются от коммутатора к пункту назначения.

Для сети Ethernet, работающей на скорости 10 Мбит/с, стандарт определяет четыре основных типа интерфейсов сети, ориентированных на различные среды передачи информации:

- 10BASE5 (толстый коаксиальный кабель);
- 10BASE2 (тонкий коаксиальный кабель);
- 10BASE-T (витая пара);
- 10BASE-FL (оптоволоконный кабель).

Наименование сегмента включает в себя три элемента: цифра «10» означает скорость передачи 10 Мбит/с, слово «BASE» – передачу в основной полосе частот (то есть без модуляции высокочастотного сигнала), а последний элемент – допустимую длину сегмента: «5» – 500 м, «2» – 200 м (точнее, 185 м), или тип линии связи: «Т» – витая пара (от англ. *Twisted-pair*), «F» – оптоволоконный кабель (от англ. *Fiber optic*).

Применение оптоволоконного кабеля в сетях Ethernet позволило сразу же значительно увеличить допустимую длину сегмента и помехоустойчивость передачи. Немаловажна также и полная гальваническая развязка компьютеров сети, которая достигается здесь без всякой дополнительной аппаратуры, в силу специфики среды передачи. Еще одно преимущество оптоволоконных кабелей состоит в возможности постепенного перехода на новые технологии без замены кабелей, так как пропускная способность оптоволоконна позволяет достигнуть не только 100 Мбит/с, но и более высоких скоростей передачи.

Передача информации в данном случае идет по двум оптоволоконным кабелям, передающим сигналы в разные стороны. Иногда используются двухпроводные оптоволоконные кабели, содержащие оптические волокна в общей внешней оболочке, но чаще – два одиночных кабеля.

В аппаратуре 10BASE-FL применяются внешние трансиверы. Схема соединения сетевого адаптера и концентратора показана на рисунке 1.

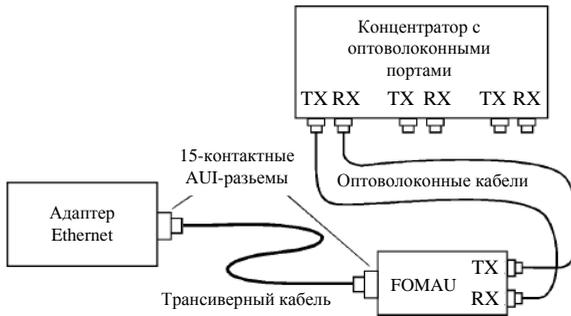


Рисунок 1 – Соединение адаптера и концентратора в 10BASE-FL

Оптоволоконный трансивер называется FOMAУ (Fiber Optic MAU). Он выполняет все функции обычного трансивера (MAU), но, кроме того, преобразует электрический сигнал в оптический при передаче и обратно при приеме. FOMAУ также формирует и контролирует сигнал целостности линии

связи, передаваемый в паузах между пакетами. Целостность линии связи индицируется светодиодами «Link» и определяется по наличию между передаваемыми пакетами сигнала «Idle» с частотой 1 МГц. Для присоединения трансивера к адаптеру применяется стандартный AUI-кабель, но длина его не должна превышать 25 м.

Имеются также сетевые адаптеры со встроенными трансиверами FOMAU, которые имеют только внешние оптоволоконные разъемы и не нуждаются в трансиверных кабелях.

Длина оптоволоконных кабелей, соединяющих трансивер и концентратор, может достигать 2 км без применения каких бы то ни было ретрансляторов. Таким образом, возможно объединение в локальную сеть компьютеров, находящихся в разных зданиях, разнесенных территориально.

В 10BASE-FL применяется многомодовый кабель и свет с длиной волны 850 нм, однако имеется аппаратура и для использования одномодового кабеля (с предельной длиной до 5 км).

Стандартный оптоволоконный кабель 10BASE-FL должен иметь на обоих концах оптоволоконные байонетные ST-разъемы, показанные на рисунке 2, *а*.

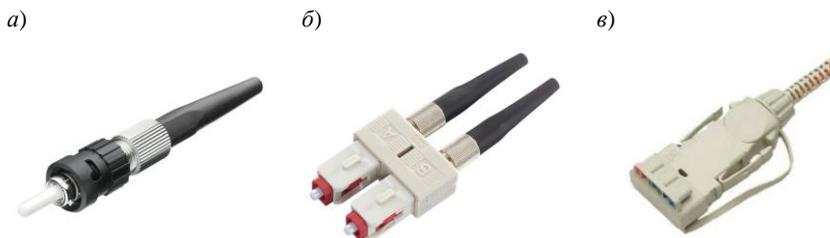


Рисунок 2 – Типы разъемов для оптоволоконного кабеля:
а – ST-разъем, *б* – SC-разъем, *в* – MIC FDDI-разъем

Используются также оптоволоконные разъемы типа SC, присоединяемые подобно RJ-45 путем простого вставления в гнездо. Разъемы SC обычно жестко соединены по два для двух кабелей (рисунок 2, *б*).

Существуют также разъемы типа MIC FDDI (рисунок 2, *в*), аналогичные разъемам SC, вставляемым в гнездо.

Минимальный набор оборудования для соединения оптоволоконным кабелем двух компьютеров включает в себя следующие элементы:

- два сетевых адаптера с трансиверными разъемами;
- два оптоволоконных трансивера (FOMAU);
- два трансиверных кабеля;
- два оптоволоконных кабеля с ST-разъемами (или с SC-разъемами).

Если требуется соединить больше двух компьютеров, то надо использовать концентратор, имеющий оптоволоконные порты. Каждый компьютер снабжается своим трансивером и трансиверным кабелем, а также двумя опто-

волоконными кабелями с соответствующими разъемами для подключения к концентратору (рисунок 3).

Создание технологии Fast Ethernet было обусловлено необходимостью увеличения скорости передачи данных до 100 Мбит/с. Технология Fast Ethernet выиграла в конкурентной борьбе с другими новыми высокоскоростными технологиями, поскольку обеспечила преемственность и согласованность с широко распространенными сетями Ethernet. При этом вся сеть остается работоспособной, в старых сегментах сети Ethernet скорость передачи данных будет 10 Мбит/с, в новых (Fast Ethernet) – 100 Мбит/с, между старыми и новыми сегментами – 10 Мбит/с.

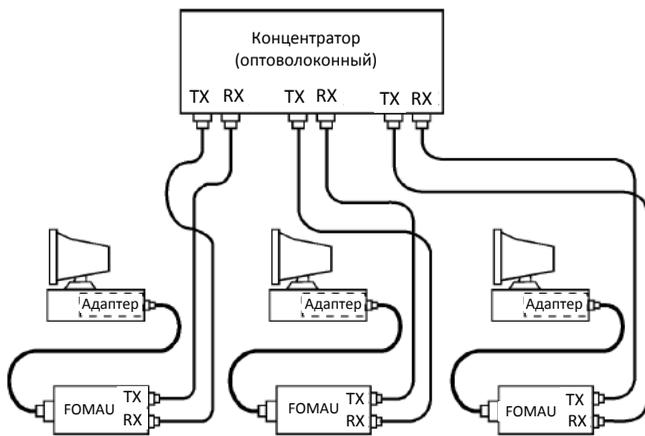


Рисунок 3 – Объединение компьютеров в сеть по стандарту 10BASE-FL

Преемственность и согласованность с сетями Ethernet обусловили ряд принципов построения новых сетей Fast Ethernet (стандарт 802.3u). Так, в технологии Fast Ethernet сохранился принцип использования общей разделяемой среды. Поскольку скорость передачи по сравнению с Ethernet увеличилась на порядок, то на порядок уменьшилось и время двойного оборота PDV. Поэтому, чтобы не потерять кадры при возникновении коллизий, диаметр сети уменьшился также на порядок – до 200 м. Однако при использовании коммутаторов в полнодуплексном режиме возникновение коллизий исключено, поэтому существуют ограничения только на длину физических сегментов, которые соединяют два соседних устройства: сетевой адаптер с коммутатором или два соседних коммутатора.

Спектр сигналов при использовании манчестерского кодирования значительно шире спектра потенциальных избыточных кодов. Поэтому, несмотря на то, что применяемый в Ethernet манчестерский код обладает очень хорошими свойствами самосинхронизации, разработчики технологии Fast Ethernet

и других технологий отказались от него. На уровне логического кодирования в Fast Ethernet используются избыточные коды 4В/5В или 8В/6Т, а на физическом уровне – код NRZI.

Точно так же для сети Ethernet, работающей на скорости 100 Мбит/с (Fast Ethernet) стандарт определяет три типа интерфейса, отличающихся типами среды передачи:

- 100BASE-T4 (счетверенная витая пара);
- 100BASE-TX (сдвоенная витая пара);
- 100BASE-FX (оптоволоконный кабель).

Здесь цифра «100» означает скорость передачи 100 Мбит/с, буква «Т» – витую пару, буква «F» – оптоволоконный кабель. Типы 100BASE-TX и 100BASE-FX иногда объединяют под именем 100BASE-X, а 100BASE-T4 и 100BASE-TX – под именем 100BASE-T.

Fast Ethernet – спецификация 100BASE-FX – предусматривает работу по двум волокнам оптического многомодового кабеля 62,5/125 мкм в полудуплексном или полнодуплексном режиме. Максимальная длина сегмента в полудуплексном режиме составляет 412 м, а в полнодуплексном – 2000 м. Метод логического кодирования – 4В/5В, физического кодирования – NRZI.

Аппаратура 100BASE-FX очень близка к аппаратуре 10BASE-FL. Точно так же здесь используется топология «звезда» с подключением компьютеров к концентратору с помощью двух разнонаправленных оптоволоконных кабелей.

Между сетевыми адаптерами и кабелями возможно включение выносных трансиверов. Как и в случае сегмента 10BASE-FL, оптоволоконные кабели подключаются к адаптеру (трансиверу) и к концентратору с помощью разъемов типа SC, ST или FDDI. Для присоединения разъемов SC и FDDI достаточно просто вставить их в гнездо, а разъемы ST имеют байонетный механизм.

Максимальная длина кабеля между компьютером и концентратором составляет 412 м, причем это ограничение определяется не качеством кабеля, а установленными временными соотношениями. Согласно стандарту, применяется многомодовый или одномодовый кабель с длиной волны света 1,35 мкм. В последнем случае потери мощности сигнала в сегменте (в кабеле и разъемах) не должны превышать 11 дБ. При этом надо учитывать, что потери в кабеле составляют 1–2 дБ/км, а потери в разъеме – от 0,5 до 2 дБ.

Как и в других сегментах Fast Ethernet, в 100BASE-FX предусмотрен контроль целостности сети, для чего в промежутках между сетевыми пакетами по кабелю передается специальный сигнал.

Сеть FDDI (от англ. – *Fiber Distributed Data Interface*, оптоволоконный распределенный интерфейс данных) – это одна из новейших разработок стандартов локальных сетей.

В отличие от других стандартных локальных сетей, стандарт FDDI изначально ориентировался на высокую скорость передачи (100 Мбит/с) и на

применение наиболее перспективного оптоволоконного кабеля. Поэтому в данном случае разработчики не были стеснены рамками старых стандартов, ориентированных на низкие скорости и электрический кабель.

Выбор оптоволоконной среды передачи определил такие преимущества новой сети, как высокая помехозащищенность, максимальная секретность передачи информации и прекрасная гальваническая развязка абонентов. Высокая скорость передачи, которая в случае оптоволоконного кабеля достигается гораздо проще, позволяет решать многие задачи, недоступные менее скоростным сетям, например, передачу изображений в реальном масштабе времени. Кроме того, оптоволоконный кабель легко решает проблему передачи данных на расстояние нескольких километров без ретрансляции, что позволяет строить большие по размерам сети, охватывающие даже целые города и имеющие при этом все преимущества локальных сетей (в частности, низкий уровень ошибок).

За основу стандарта FDDI был взят метод маркерного доступа, предусмотренный международным стандартом IEEE 802.5 (Token Ring). Несущественные отличия от этого стандарта определяются необходимостью обеспечить высокую скорость передачи информации на большие расстояния.

Топология сети FDDI – это кольцо, наиболее подходящая топология для оптоволоконного кабеля. В сети применяются два разнонаправленных оптоволоконных кабеля, один из которых обычно находится в резерве, однако такое решение позволяет использовать и полнодуплексную передачу информации (одновременно в двух направлениях) с удвоенной эффективной скоростью в 200 Мбит/с, при этом каждый из двух каналов работает на скорости 100 Мбит/с. Применяется и звездно-кольцевая топология с концентраторами, включенными в кольцо.

Основные технические характеристики сети FDDI:

- максимальное количество абонентов сети – 1000;
- максимальная протяженность кольца сети – 20 км;
- максимальное расстояние между абонентами сети – 2 км;
- среда передачи – многомодовый оптоволоконный кабель (возможно применение электрической витой пары);
- метод доступа – маркерный;
- скорость передачи информации – 100 Мбит/с (200 Мбит/с для дуплексного режима передачи).

Стандарт FDDI имеет значительные преимущества по сравнению со всеми рассмотренными ранее технологиями. Например, сеть Fast Ethernet, имеющая такую же пропускную способность (100 Мбит/с), не может сравниться с FDDI по допустимым размерам сети. К тому же маркерный метод доступа FDDI обеспечивает в отличие от CSMA/CD гарантированное время доступа и отсутствие конфликтов при любом уровне нагрузки.

Для передачи данных в FDDI применяется код 4B/5B, специально разработанный для этого стандарта. Главный принцип кода – избежать длинных последовательностей нулей и единиц. Это позволяет приемнику восстанавливать синхронизацию приходящих данных один раз на четыре принятых бита. Таким образом, достигается компромисс между простейшим кодом NRZ и самосинхронизирующимся на каждом бите манчестерским кодом.

Стандарт FDDI для достижения высокой гибкости сети предусматривает включение в кольцо абонентов двух типов:

- абоненты *класса А* (абоненты двойного подключения, DAS – Dual-Attachment Stations) подключаются к обоим (внутреннему и внешнему) кольцам сети. При этом реализуется возможность обмена со скоростью до 200 Мбит/с или резервирования кабеля сети. Аппаратура этого класса применяется в самых критичных с точки зрения быстродействия частях сети;

- абоненты *класса В* (абоненты одинарного подключения, SAS – Single-Attachment Stations) подключаются только к одному (внешнему) кольцу сети. Они более простые и дешевые по сравнению с абонентами класса А, но не имеют их возможностей. В сеть они могут включаться только через концентратор или обходной коммутатор, отключающий их в случае аварии.

Технология асинхронного режима передачи (ATM – Asynchronous Transfer Mode) отличается от других сетевых технологий тем, что для передачи используются 53-байтовые ячейки – блоки фиксированной длины.

Сетевые соединения, использующие ячейки, наиболее эффективно работают в режиме двухточечного соединения (point-to-point), когда принимающая станция находится в состоянии активности и готова к приему и обработке ячеек. Благодаря одинаковой величине ячеек устройства, обслуживающие технологию ATM, могут точно определить заголовок ячейки и начало блока данных. Это ускоряет процесс обработки и позволяет ATM-сетям работать со скоростью до 622 Мбит/с. Прогнозируемые скорости передачи данных и виртуальные каналы позволяют гарантировать высокий уровень обслуживания для большей части трафика.

ATM-технология отличается от технологии Ethernet тем, что является коммутируемой технологией, в которой виртуальные каналы устанавливаются до начала передачи. Ethernet не создает виртуальных каналов, более того, они отсылают сообщение без предварительного уведомления. Совокупность виртуальных каналов образует маршрут, или виртуальный путь.

Виртуальный канал представляет собой фрагмент логического соединения, по которому производится передача данных одного пользовательского процесса. Виртуальный путь представляет собой группу виртуальных каналов, которые в пределах данного интерфейса имеют одинаковое направление передачи данных.

ATM обеспечивает оказание двух видов услуг в области соединения виртуальных каналов: коммутируемые виртуальные каналы (SVC) и постоянные виртуальные каналы (PVC). Коммутируемые виртуальные каналы (SVC) –

кратковременное соединение, требующее установки и прекращения вызова. Постоянные виртуальные каналы (PVC) подобны выделенным частным каналам, поскольку соединение в них устанавливается на постоянной основе.

Основные свойства метода ATM:

- исходное сообщение после представления в цифровой форме и перед передачей в сеть связи разделяется на протокольные блоки фиксированной длины, равной 48 байтам;

- каждый протокольный блок дополняется служебной частью – заголовком размером 5 байт, образуя ячейку ATM размером 53 байта; заголовок содержит адресную часть, элементы защиты заголовка от ошибок и другую служебную информацию, необходимую для гарантированной доставки ячеек через сеть;

- последовательность ячеек ATM, принадлежащих одному сообщению, передается через виртуальные соединения (постоянные или коммутируемые), поддерживаемые коммутаторами ATM, в которых обрабатываются только заголовки ячеек;

- при прохождении ячеек через коммутатор ATM ячейки накапливаются в промежуточных буферах коммутатора, что обеспечивает возможность статистического использования сетевых ресурсов;

- на стороне адресата ячейки ATM освобождаются от заголовков и собираются в единую последовательность, из которой затем формируется исходное сообщение.

Задача коммутатора ATM – найти соответствующее соединение в таблице коммутации, чтобы определить выходной порт (или порты), а также новые виртуальные каналы и пути.

Порядок выполнения работы

1 Изучите краткие сведения из теории и ответьте на контрольный вопрос, заданный преподавателем.

2 В данной работе изучаются принципы построения локальных сетей на основе оптоволоконных систем в пакете NetCracker. Необходимо смоделировать сеть передачи данных для главного офиса (Main office) и трех филиалов (Branch 1, Branch 2, Branch 3). В правом окне «Device» пакета NetCracker в разделе «Buildings, campuses and LAN workgroups» необходимо выбрать здания и перетащить их на рабочую область, как это показано на рисунке 4.

При нажатии правой клавишей на знаке здания и выборе пункта «Expand» открывается окно локальной сети здания. В каждом здании необходимо установить маршрутизатор (Router) из пункта «Routers and Bridges», коммутатор (Switch) из пункта «Switches», абонентские устройства (PC, Notebook) из пункта «LAN workstation», сервера (Server) из пункта «LAN Servers». Количество абонентских устройств и серверов в каждом из зданий определяется по варианту, выданному преподавателем из таблицы 1.

В программном пакете NetCracker возможно создание серверов разных видов:

– файловый сервер (File Server) – серверное программное обеспечение управления доступом к файлам и другим дисковым ресурсам сети. Устанавливается, как правило, на выделенном мощном компьютере, который помимо управления доступом к файлам и другим дисковым ресурсам ЛВС обеспечивает безопасность и синхронизацию. Безопасность понимается в том смысле, что доступ к отдельным файлам могут получить только авторизованные пользователи, обладающие соответствующими правами. Синхронизация заключается в блокировке доступа к файлам и записям и предназначена для защиты данных от повреждения при одновременной попытке их изменения несколькими пользователями;

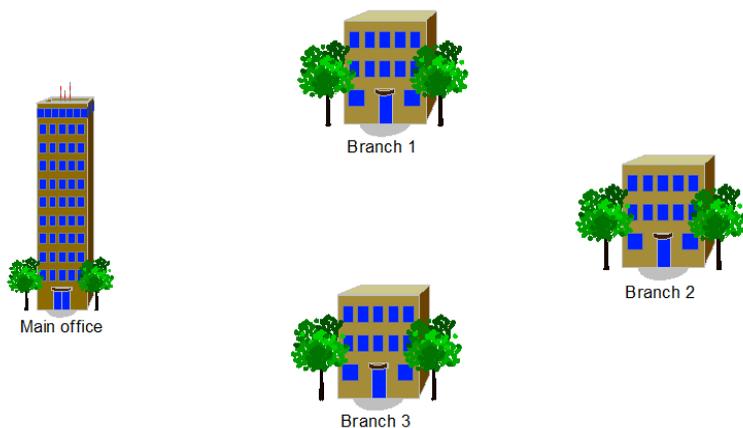


Рисунок 4 – Сеть зданий для установления соединения

Таблица 1 – Исходные данные для моделирования сети

Номер варианта	Количество компьютеров / тип сервера			
	Главный офис	Филиал 1	Филиал 2	Филиал 3
1	3 / File сервер	1 / E-mail сервер	2 / HTTP сервер	2 / Database
2	2 / E-mail сервер	2 / File сервер	1 / Database	1 / HTTP сервер
3	3 / HTTP сервер	1 / E-mail сервер	3 / File сервер	2 / Database
4	2 / HTTP сервер	2 / Database	2 / E-mail сервер	1 / File сервер
5	3 / File сервер	1 / HTTP сервер	1 / Database	2 / E-mail сервер
6	2 / File сервер	3 / E-mail сервер	3 / Database	1 / HTTP сервер
7	2 / Database	2 / File сервер	2 / E-mail сервер	2 / HTTP сервер
8	3 / E-mail сервер	2 / Database	1 / HTTP сервер	1 / File сервер
9	1 / Database	2 / HTTP сервер	3 / E-mail сервер	1 / File сервер

Окончание таблицы 1

Номер варианта	Количество компьютеров / тип сервера			
	Главный офис	Филиал 1	Филиал 2	Филиал 3
10	2 / Database	1 / E-mail сервер	2 / File сервер	2 / HTTP сервер
11	2 / File сервер	2 / Database	1 / HTTP сервер	1 / E-mail сервер
12	1 / E-mail сервер	2 / HTTP сервер	3 / Database	2 / File сервер
13	2 / HTTP сервер	3 / E-mail сервер	2 / File сервер	1 / Database
14	3 / File сервер	3 / Database	1 / E-mail сервер	2 / HTTP сервер

– SQL сервер (SQL Server) – серверная специализированная программа обращения к БД, поддерживающая язык структурированных запросов. Для работы не требует выделенного компьютера;

– сервер БД малого офиса (Small office database server) – программное обеспечение, с помощью которого можно организовать доступ нескольких узлов сети к записям файла БД. Не требует выделенного компьютера. Используется в ЛВС, поддерживающих архитектуру «клиент-сервер»;

– FTP сервер (FTP Server) – сервер, предоставляющий ресурсы БД удаленным узлам интерсети, взаимодействующим с ним в режиме «терминал-хост». В работе использует протокол передачи файлов (File Transfer Protocol – FTP), реализуемый приложением для работы в Internet. Он позволяет передавать файлы между разнотипными узлами, поскольку использует общую файловую структуру, независимую от операционных систем;

– сервер электронной почты (E-mail Server) – программа, которая управляет доставкой электронной почты и другой информации. Для работы почтового сервера выделенный компьютер не требуется;

– HTTP сервер (HTTP Server) – сервер, предоставляющий ресурсы web-сайтов. Взаимодействует с HTTP клиентом по протоколу передачи гипертекста (Huper Text Transfer Protocol – HTTP). Используется в сетях, поддерживающих архитектуру «клиент-сервер».

Для задания типа сервера на него необходимо установить специализированное программное обеспечение, для этого в разделе «Network and enterprise software» → «Sever software» выберите соответствующее программное обеспечение в виде диска и перетяните его на сервер. Так, например, для создания Email-сервера выбирается диск с названием «E-mail server» и устанавливается на сервер. Для соединения абонентских устройств необходимо установить на них интерфейсные платы. В разделе «LAN adapters» следует выбрать интерфейсные платы для разных технологий (Ethernet, Fast Ethernet, FDDI, ATM). Для установки платы ее необходимо перетянуть на абонентское устройство.

Для соединения элементов между собой необходимо выбрать отмеченную под номером 1 кнопку на рисунке 5 и нажать на устройства, которые необходимо соединить, в результате чего откроется окно задания параметров соединения (рисунк 6). В данной лабораторной работе соединения между устрой-

ствами должны быть одинаковой технологии (Ethernet, Fast Ethernet, FDDI, ATM). Установите соединение по технологии FDDI. В нижнем левом углу в пункте «Media» выберите «Fiber Optic Cable».

При соединении маршрутизаторов между собой необходимо установить в окне задания параметров соединения длину кабеля «Cable Length» – 2 км.

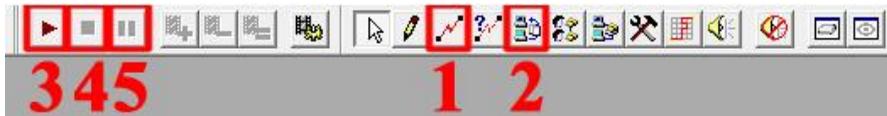


Рисунок 5 – Панель инструментов пакета NetCracker

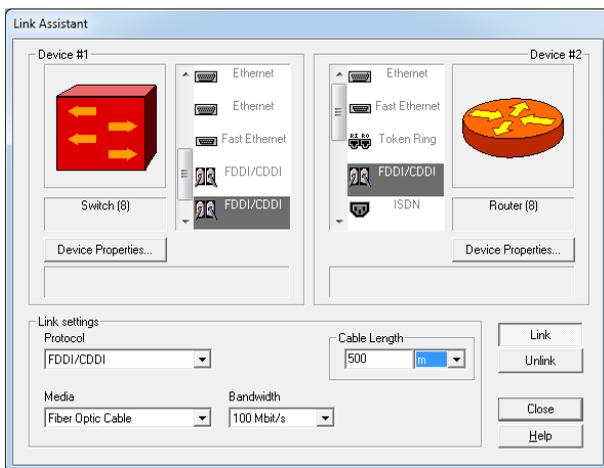


Рисунок 6 – Окно задания параметров соединения

3 Организовать передачу данных между следующими устройствами:

- 1-й, 2-й компьютеры главного офиса → сервер филиала 1;
- 2-й, 3-й компьютеры главного офиса → сервер филиала 2;
- 1-й компьютер главного офиса → 1-й компьютер филиала 1;
- 2-й компьютер главного офиса → 2-й компьютер филиала 2;
- 3-й компьютер главного офиса → 1-й или 2-й компьютер филиала 3;
- 1-й, 2-й компьютеры филиала 1 → сервер главного офиса;
- 2-й, 3-й компьютеры филиала 1 → сервер филиала 2;
- 3-й или 1-й компьютер филиала 1 → сервер филиала 3;
- 2-й или 3-й компьютер филиала 1 → 1-й компьютер филиала 2;
- 1-й или 3-й компьютер филиала 2 → сервер главного офиса;
- 2-й или 3-й компьютер филиала 2 → сервер филиала 1;
- 2-й или 1-й компьютер филиала 2 → сервер филиала 3;

- 1-й или 3-й компьютер филиала 2 → 1-й или 2-й компьютер филиала 3;
- 1-й или 2-й компьютер филиала 3 → сервер главного офиса;
- 1-й компьютер филиала 3 → сервер филиала 1;
- 2-й или 1-й компьютер филиала 3 → сервер филиала 2;
- 1-й компьютер филиала 3 → 1-й или 2-й компьютер главного офиса.

В результате сеть приобретет вид, показанный для примера на рисунке 7.

При нажатии кнопки задания трафика (см. рисунок 5, кнопка 2) необходимо выбрать источник и приемник трафика. Далее в появившемся окне выбрать тип трафика (рисунок 8, а). При соединении компьютеров с серверами необходимо выбирать профиль, соответствующий типу сервера. Так, при соединении компьютера с File сервером профиль трафика выбирается File server's client. При соединении компьютера с E-mail сервером – профиль трафика E-mail (POP) или E-mail (SMTP). При соединении компьютера с Database сервером – профиль трафика Database. При соединении компьютеров разных филиалов необходимо выбрать тип профиля Small InterLAN traffic.

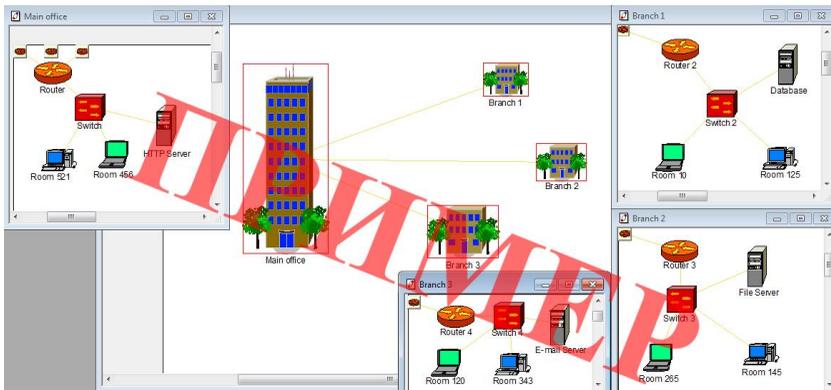


Рисунок 7 – Сеть передачи данных по технологии FDDI

Для передачи данных в NetCracker Professional есть возможность задавать разные типы профилей трафика:

- CAM/CAD – графические файлы;
- Database – данные разделяемых ресурсов;
- E-mail – электронная почта в ЛВС;
- FTP client – передача файлов;
- Small office – данные документооборота малого офиса;
- HTTP client – данные гипертекстов (web-страниц);
- LAN peer-to-peer traffic – передача данных в одноранговом режиме (точка – точка);
- InterLAN traffic – внешний трафик ЛВС;

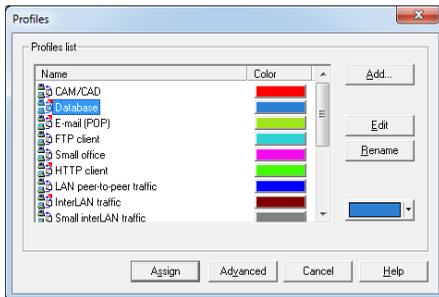
- Small InterLAN traffic – внешний трафик малого офиса;
- File Server’s client – трафик клиента файлового сервера;
- Small office database server’s client – трафик клиента сервера для БД малого офиса;
- SQL server’s client – трафик клиента SQL сервера;
- Small office peer-to-peer – передача данных малого офиса в одноранговом режиме;
- Voice over IP peer-to-peer – передача голосового трафика IP-пакетами;
- E-mail (SMTP) – трафик приложения электронной почты стека TCP/IP.

Для задания параметров трафика необходимо в окне на рисунке 8, а нажать на кнопку «Edit», в результате чего появится окно для ввода параметров трафика (рисунок 8, б).

Для каждого вида передачи данных может быть задан закон распределения:

- постоянная величина (Constant);
- экспоненциальное распределение (Exponential) – между независимыми событиями, появляющимися с постоянной интенсивностью;
- равномерное распределение (Uniform);
- нормальное распределение (Normal);
- логарифмически-нормальное распределение (Lognormal);
- гамма-распределение (Gamma);
- распределение Эрланга (Erlang);
- распределение Вейбулла (Weibull).

а)



б)

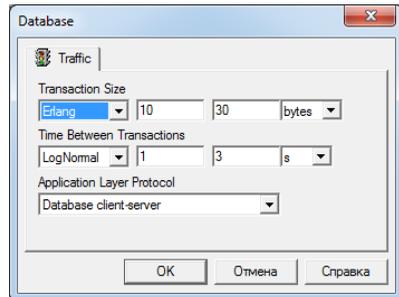


Рисунок 8 – Задание типа трафика

Законы распределения и их параметры выбираются из таблицы 2.

4 Для запуска процесса моделирования необходимо нажать кнопку запуска моделирования (см. рисунок 5, кнопка 3). В смоделированной сети начнется передача пакетов данных, которые представлены в виде цветных прямоугольников (рисунок 9). По истечению некоторого времени моделирование можно остановить, нажав на соответствующую кнопку (см. рисунок 5,

кнопка 4), и собрать статистические данные о работе сети. Для этого в меню «Tool» → «Reports» → «Wizard» необходимо выбрать раздел «Statistical» → «Data flows» → «Application statistics». В результате появится отчет о времени передачи данных (рисунок 10). Информацию о количестве переданных и принятых пакетов каждым из устройств можно получить, выбрав пункт меню «Tool» → «Reports» → «Network Device statistic».

Таблица 2 – Параметры для типов профилей трафика

Тип профиля трафика	Объем переданных данных (Transaction size)		Время между передачами данных, с (Time between transactions, s)	
	Закон распределения	Значение параметров	Закон распределения	Значение параметров
CAM/CAD	Uniform	5–10	Uniform	5–10
Database	Erlang	10–30	Lognormal	1–3
E-mail(POP)	Normal	8–10	Normal	2–8
FTP client	Lognormal	1–2	Normal	3–5
Small office	Lognormal	5–10	Uniform	3–8
HTTP client	Uniform	1–2	Constant	2
LAN peer-to-peer traffic	Exponential	5–10	Exponential	3–10
InterLAN traffic	Exponential	1–3	Exponential	5–8
Small InterLAN traffic	Exponential </td <td>4–10</td> <td>Exponential</td> <td>8–10</td>	4–10	Exponential	8–10
File Server's client	Uniform	5–10	Exponential	2–5
Small office database server's client	Erlang	5–20	Normal	5–9
SQL server's client	Erlang	0,1–0,5	Exponential	3–5
Small office peer-to-peer	Exponential	6–10	Normal	5–10
E-mail (SMTP)	Uniform	1–5	Exponential	5–8



Рисунок 9 – Процесс моделирования передачи данных

- 11 Типы виртуальных каналов.
- 12 Свойства технологии ATM.
- 13 Отличия ATM и Ethernet.
- 14 Необходимые элементы сети для соединения устройств оптоволоконным кабелем по технологии Fast Ethernet.

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ SDH

Цель работы: изучить принципы построения сетей SDH по звездной и кольцевой топологиям, научиться моделировать сети передачи данных для предприятия на основе технологий SDH в пакете NetCracker.

Краткие сведения из теории

Технология SDH (Synchronous Digital Hierarchy) – это стандарт первичных сетей, определяющий иерархию уровней синхронных транспортных модулей (Synchronous Transport Module – STM) для совместимости оборудования различных производителей, с возможностью передачи информации по физической среде. Скорости передачи транспортных модулей технологии SDH приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Скорости передачи технологии SDH

Уровень модуля	Скорость, Мбит/с
STM-1	155,52
STM-4	622,08
STM-16	2 488,32
STM-64	9 953,28

Сети SDH относятся к классу сетей с коммутацией каналов на базе синхронного мультиплексирования с разделением по времени (Time Division Multiplexing – TDM), при котором адресация информации от отдельных абонентов определяется ее относительным временным положением внутри составного кадра. При этом оконечное оборудование SDH оперирует потоками E1 (2,048 Мбит/с), к которым подключается клиентское оборудование.

Сеть на базе технологии SDH способна обеспечивать передачу данных большинства существующих телекоммуникационных технологий по оптическим сетям (в том числе ATM, Ethernet).

Основными устройствами сети являются мультиплексоры SDH. Они соединяются между собой волоконно-оптическими линиями связи и образуют среду, в которой организуются цифровые каналы между точками подключения абонентского оборудования или оборудования вторичных (наложенных) сетей самого оператора – телефонных сетей и сетей передачи данных.

Существуют следующие базовые топологии сети, организованной по технологии SDH: «точка – точка», последовательная линейная цепь (рисунок 1), звездная и кольцевая (рисунок 2).

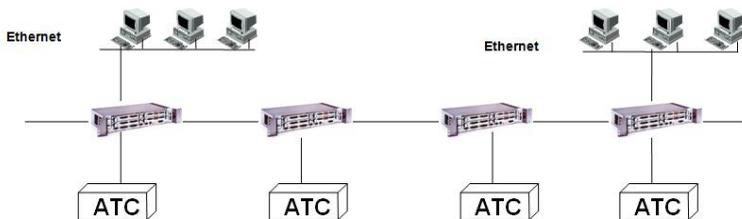


Рисунок 1 – Последовательная линейная цепь

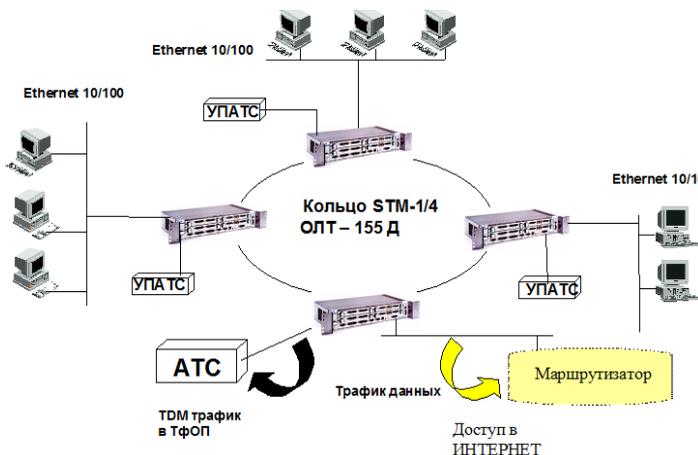


Рисунок 2 – Кольцевая топология

При построении сетей SDH обычно используется топология сети типа «кольцо» с двумя контурами. По одному из контуров передается синхронизирующая и сигнальная информация, по другому – основной трафик. Имеются специальные механизмы резервирования сети на случай выхода из строя одного из контуров. Возможно также подключение устройств по топологии «точка – точка», однако в таком случае отказоустойчивость решения будет ниже. Централизованное управление сетью обеспечивает полный мониторинг состояния каналов и узлов. Использование кольцевых топологий предоставляет возможность автоматического переключения каналов при любых аварийных ситуациях на резервный путь. Оборудование SDH предусматривает возможность резервирования линии и основных аппаратных блоков по схеме

1+1 («один плюс один»), при аварии автоматически переключая трафик на резервное направление. Это свойство значительно повышает надежность сети и позволяет проводить различные технологические работы без перерыва в предоставлении услуг.

Рассмотрим маршрут однонаправленного кольца с переключением, которое обеспечивает защиту на уровне маршрута. На рисунке 3, *а* показаны два кольца, по которым в разных направлениях распространяются данные. Предположим, что основная нагрузка проходит по часовой стрелке, а резервное кольцо передает нагрузку против часовой стрелки.

На рисунке 3, *б* указаны потоки информации, идущие от мультиплексора ввода-вывода 4 (МВВ4) к мультиплексору 2 в нормальном режиме, при отсутствии повреждения линий. На узле 4 передаваемая информация разделяется на два потока, идущие в двух направлениях: один по основному пути (по часовой стрелке), а второй – по резервному (против часовой стрелки). Этот путь между парой узлов обеспечен защитой 1+1 на уровне маршрута, т. е. зарезервировано прохождение информации на всей сети.

При методе однонаправленного коммутируемого кольца каждый узел следит за сигналами, приходящими по двум маршрутам, и выбирает лучший из них. Например, как показано на рисунке 3, *в* один из участков поврежден. Тогда узел МВВ2 не получает сигналов и посылает в направлении по часовой стрелке сигнал аварии в заголовке. При получении сигнала аварии каждый узел определяет, с какой стороны пришел сигнал от соседнего узла, и переключается на резервный путь, идущий в другом направлении. На рисунке 3, *в* на узел МВВ4 должен прийти сигнал «авария» от узла МВВ2 (передаваемый по часовой стрелке), МВВ4 должен переключиться на резервный путь, где информация передается против часовой стрелки. Таким образом, связь между узлами МВВ4 и МВВ2 не прерывается.

Метод однонаправленного коммутируемого кольца обеспечивает быструю защиту, но неэффективен в смысле использования пропускной способности каналов, поскольку задействует для одного и того же сигнала два пути. Если путь использует один STM-N, то точно такой же сигнал будет идти в обратном направлении.

Сложные сети обычно имеют многоуровневую структуру. Первый уровень – оборудование доступа пользователей. Этот уровень состоит из оборудования «последней мили» и, как правило, мультиплексоров STM-1. Первое отвечает за доведение сигнала пользователей (чаще всего сигнала E1, E3) до мультиплексоров первого уровня. В роли оборудования «последней мили» обычно выступает оборудование технологий xDSL или xPON. Мультиплексоры данного уровня собирают каналы пользователей для дальнейшей транспортировки. Следующий уровень могут составлять мультиплексоры уровня STM-4 и STM-16.

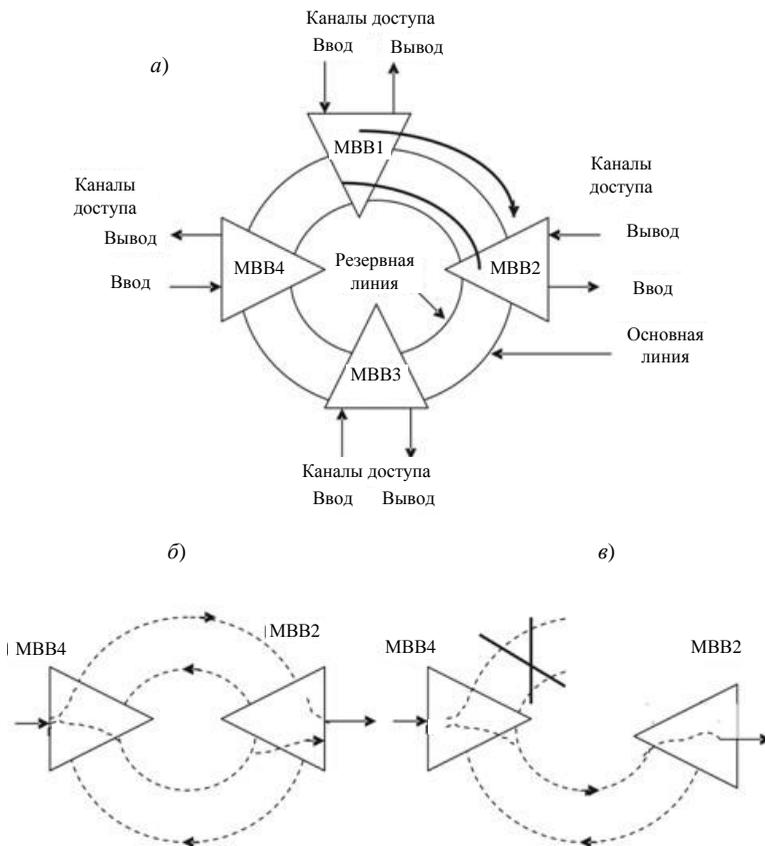


Рисунок 3 – Кольцо с переключением маршрута (а); с передачей информации от MBB4 к MBB2 при нормально функционирующей сети (б); с передачей информации от MBB4 к MBB2 при повреждении (в)

Основными преимуществами технологии SDH являются:

- простая технология мультиплексирования/демультиплексирования;
- доступ к низкоскоростным сигналам без необходимости мультиплексирования/демультиплексирования всего высокоскоростного канала, что позволяет легко осуществлять подключение клиентского оборудования и производить кросс-коммутацию потоков;
- наличие механизмов резервирования на случай отказов каналов связи или оборудования;
- возможность создания «прозрачных» каналов связи, которые необходимы для решения определенных задач (например, передачи голосового трафика между выносами АТС или передачи телеметрии);

- возможности наращивания решения;
- совместимость оборудования от различных производителей;
- относительно низкая стоимость оборудования;
- быстрота настройки и конфигурирования устройств.

К недостаткам технологии SDH можно отнести:

- использование одного из каналов полностью под служебный трафик;
- неэффективное использование пропускной способности каналов связи (необходимость резервирования полосы на случай отказов, неспособность динамически выделять полосу пропускания под различные приложения, отсутствие механизмов приоритизации трафика);
- необходимость использования дополнительного оборудования (зачастую от других производителей), для того чтобы обеспечить передачу различных типов трафика по опорной сети;
- ограниченные возможности масштабирования сети.

SDH мультиплексор серии ОЛТ-155Д – это мультиплексор ввода-вывода, который может использоваться для создания сетей кольцевых и линейных топологий с пропускной способностью 63×2 Мбит/с или 3×34/45 Мбит/с и подключения локальных вычислительных сетей через интерфейсы Ethernet 10/100BaseT. Предназначен для сетей связи со смешанным трафиком (голос и данные). Особенностью этого мультиплексора является совместимость с сетями SDH, построенными на оборудовании разных производителей. Мультиплексор включает в себя оптические и/или электрические интерфейсы агрегатных потоков STM-1 (155 Мбит/с), оптические интерфейсы агрегатных потоков STM-4 (622 Мбит/с) а также дополнительные интерфейсы компонентных потоков: 2, 34 и 45 Мбит/с (G.703) и Ethernet 10/100BaseT (рисунок 4).

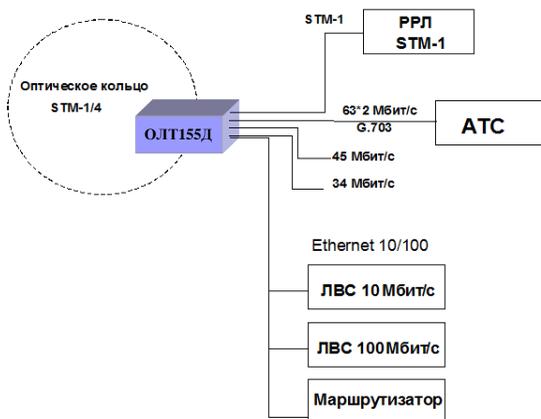


Рисунок 4 – Сетевые интерфейсы ОЛТ-155Д

Мультиплексоры ОЛТ-155Д могут использоваться для создания контуров местной связи, подключенных к сетям ТфОП посредством интерфейса STM-1/4. Эти контуры могут быть внедрены в любые области, где применяются волоконно-оптические кабели, например, промышленные и бизнес-зоны, городские и пригородные жилые зоны.

Мультиплексор ОЛТ-155Д обеспечивает возможность прямого подключения к мультиплексорам более высокого транспортного уровня через оптический или электрический интерфейсы STM-1 (рисунок 5). Внешний вид мультиплексора ОЛТ-155Д показан на рисунке 6, а его структурная схема – на рисунке 7.

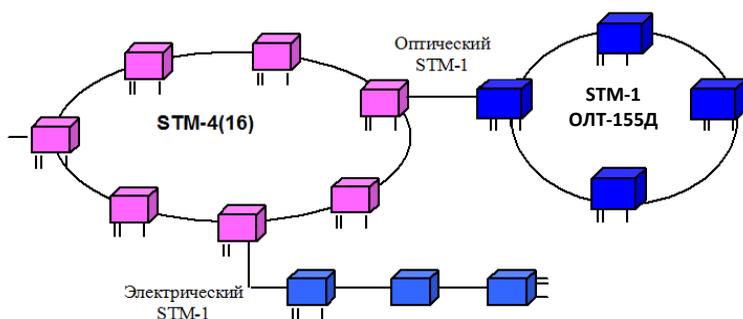


Рисунок 5 – Типовое использование ОЛТ-155Д для расширения существующей SDH сети



Рисунок 6 – Внешний вид мультиплексора ОЛТ-155Д

Транспортные SDH сети в крупных городах обычно строятся в виде защищенной кольцевой структуры со скоростью агрегатных потоков 622 Мбит/с, 2,4 Гбит/с или 10 Гбит/с. В узлах доступа таких сетей, как правило, предусматривается возможность подключения выделенных корпоративных или ведомственных волоконно-оптических сетей через интерфейс STM-1 (155 Мбит/с) или STM-4 (622 Мбит/с).

Мультиплексор ОЛТ-2500 eXtra – мультиплексор ввода-вывода, который позволяет строить сети STM-16 по кольцевой или линейной топологиям с интерфейсами E1, E3, STM-1, STM-4, STM-16 и Gigabit Ethernet. ОЛТ-2500 eXtra, используемый вместе с ОЛТ-155Д (рисунок 7), может создавать локальные

сети доступа, связанные общей сетью по технологии SDH (рисунок 8). Оборудование создано для организации сложного кольца или сети со смешанным трафиком, объединяющим голос и данные, по высококачественной волоконно-оптической линии связи, совместимой с сетями общего пользования.



Рисунок 7 – Структура мультиплексора ОЛТ-155Д

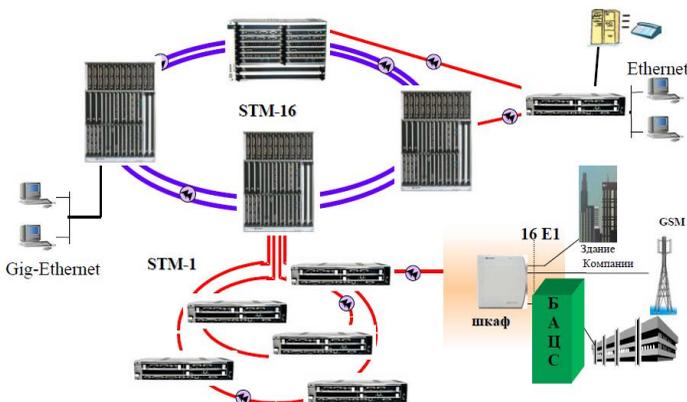


Рисунок 8 – Организация сети с помощью мультиплексора ОЛТ-2500 eXtra

ОЛТ-2500 eXtra является универсальной платформой: он может быть сконфигурирован в качестве терминального мультиплексора, мультиплексора ввода-вывода, регенератора или кроссконнектора (рисунок 9)

Мультиплексор ОЛТ-10000 – полноценный, компактный мультиплексор ввода-вывода уровня STM-64, который можно использовать в качестве регенератора STM-16.



Рисунок 9 – Внешний вид ОЛТ-2500 eXtra

ОЛТ-10000 обеспечивает совместную передачу трафика формата TDM через интерфейсы STM1, STM4, STM16, STM64 и передачу пакетных данных по интерфейсу 1000 Base SX (Gigabit Ethernet), при этом используя все преимущества SDH технологии: механизмы защиты, возможность наращивания, легкую интеграцию в существующей сети. Для управления на элементном уровне ОЛТ-10000 снабжен встроенными SNMP агентом и HTTP сервером.

Основные возможности ОЛТ-10000:

- позволяет использовать все стандартные типы защиты трафика, используемые технологией SDH: защита мультиплексорной секции (MSP), направления (SNC-P) или кольца (MS-Spring) на любом уровне;
- обеспечивает различные виды интерфейсов E1, E3, STM-1, STM-4, STM-16 и STM-64, а также 10/100BASE-T, 100BASE-Fx, 1000Base-SX/LX;
- обеспечивает защиту 1+1 на аппаратном уровне (управление, питание, синхронизация и кросс-коммутация);
- обеспечивает установку 12 модулей уровня STM-64 в один терминал.

ОЛТ-10000 обеспечивает 10/100Base-T, 1000BASE-Fx, интерфейсы Ethernet для доступа и передачи данных со скоростями 10, 100 и 1000 Мбит/с соответственно.

Порядок выполнения работы

1 Изучите краткие сведения из теории и ответьте на контрольный вопрос, заданный преподавателем.

2 В данной работе изучаются принципы построения сетей на основе технологии SDH в пакете NetCracker. За основу берется сеть, построенная в лабораторной работе № 4 по технологии Ethernet. При этом необходимо удалить все соединения между маршрутизаторами.

В главное окно проекта добавить 4 мультиплексора (Time Division Multiplexer), которые можно найти в разделе «Multiplexers and Digital Cross-Connect Systems». Мультиплексоры соединятся между собой по топологии звезда (рисунок 10), параметры их соединения показаны на рисунке 11, а. При этом необходимо устанавливать длину кабеля в соответствии с номером варианта из таблицы 2. Мультиплексор необходимо соединить с маршрутизатором (см. рисунок 10), параметры соединения показаны на рисунке 11, б.

В каждый объект добавляется телефонная сеть, которая состоит из АТС и телефонных аппаратов. АТС (PBX) выбирается в разделе «PBX». Телефонные аппараты (Telephone) выбираются в разделе «Audio equipment». В каждом филиале одна АТС и два телефонных аппарата. Параметры соединений АТС – мультиплексор и АТС – телефонный аппарат показаны на рисунке 12.

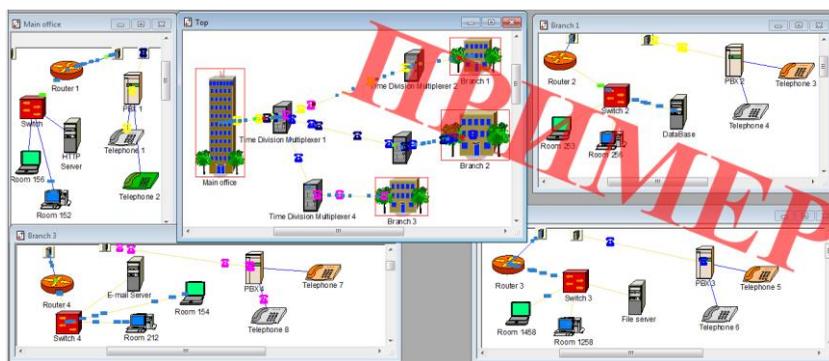


Рисунок 10 – Моделирование звездной топологии сети SDN

Таблица 2 – Исходные данные для моделирования звездной топологии сети SDN

Номер варианта	Расстояние от главного офиса до филиалов, км		
	до филиала 1	до филиала 2	до филиала 3
1	500	1000	300
2	1000	500	900
3	300	900	500
4	600	400	300
5	900	600	800
6	1000	800	600
7	700	300	500
8	800	700	600
9	400	600	700
10	800	400	600
11	600	800	1000
12	1000	500	800
13	900	1000	500
14	500	900	400

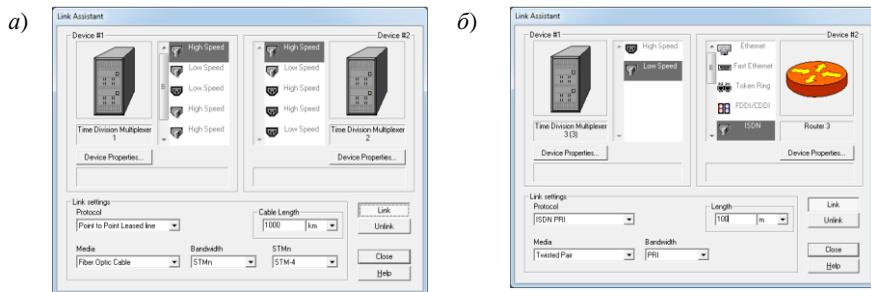


Рисунок 11 – Соединение мультиплексов (а), мультиплекса и маршрутизатора (б)

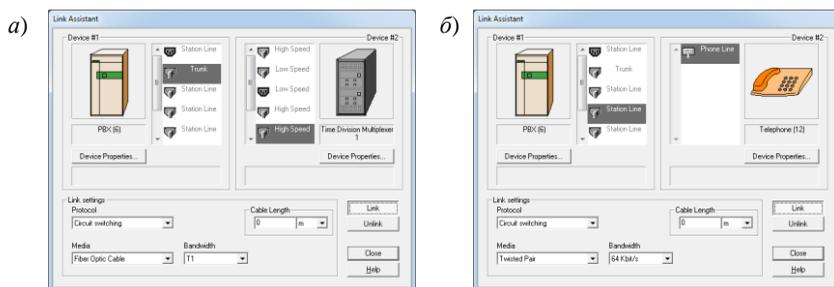


Рисунок 12 – Соединение мультиплексов и АТС (а), АТС и телефонного аппарата (б)

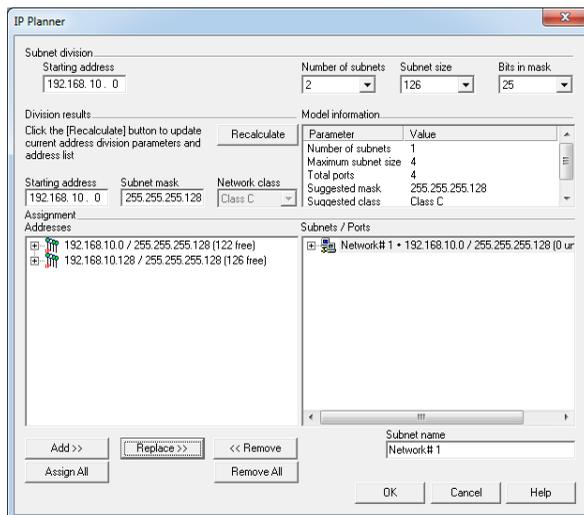


Рисунок 13 – Окно автоматического назначения IP-адресов

3 В меню «Tool» → «IP planer» задать публичные IP-адреса маршрутизаторам (рисунок 13). Для этого в окне «Number of subnets» необходимо выбрать две подсети и нажать кнопку «Recalculate». В окне «Assignment Addresses» появятся рассчитанные IP-адреса. Затем необходимо выбрать первую строчку, в соседнем окне «Subnets/Ports» – единственную сеть и нажать кнопку «Replace». Рассчитанные IP-адреса автоматически установятся на маршрутизаторах.

4 Для установления телефонного трафика между телефонными абонентами необходимо выбрать инструмент «Set voice calls» на панели инструментов (на рисунке 14 отмечен цифрой 1) и указать на двух абонентов, между которыми необходимо установить передачу данных. В появившемся окне настройки трафика выбрать «Voice call» и нажать на кнопку «Edit» (установите параметры, как на рисунке 15).



Рисунок 14 – Панель инструментов пакета NetCracker

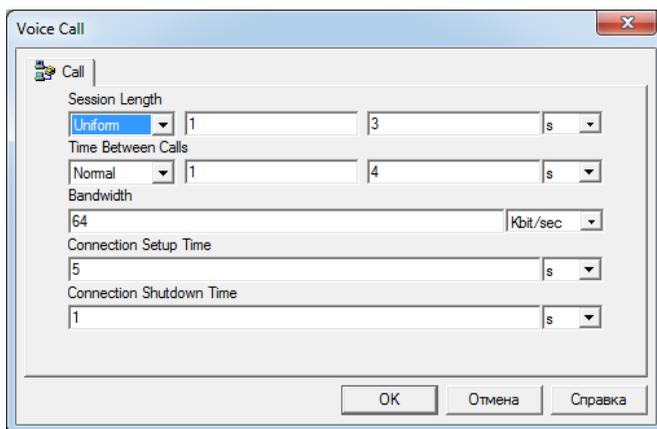


Рисунок 15 – Параметры телефонного трафика

5 Запустите моделирование, через некоторое время его приостановите и просмотрите статистические данные о работе сети. Для этого в меню «Tool» → «Reports» → «Wizard» выберете «Statistical» → «Data flows» → «Application statistic». В результате появится отчет о времени передачи данных. Необходимо получить отчет о количестве переданных и принятых пакетов каждым из устройств, выбрав в пункте меню «Tool» → «Reports» → «Network Device statistics». Отчет о загрузке линий связи можно получить, выбрав в разделе

«Tool» → «Reports» → «Wizard» пункт «WAN» → «WAN Links statistics». Отчет о телефонных звонках можно получить, выбрав в разделе «Tool» → «Reports» → «Wizard» пункт «Statistical» → «Data flows» → «Voice call Sources statistics».

6 Удалите соединения между мультиплексорами. Установите соединения по топологии кольцо (рисунок 16). Параметры соединения показаны на рисунке 11. Длины кабелей между объектами выбираются из таблицы 3 в соответствии с номером варианта.

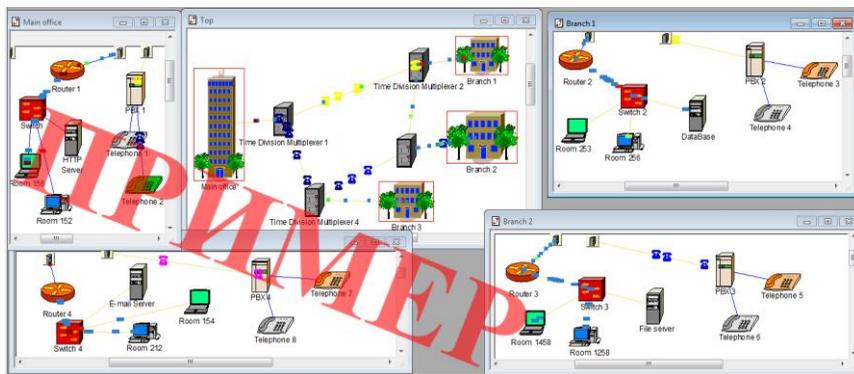


Рисунок 16 – Моделирование кольцевой топологии сети SDH

Таблица 3 – Исходные данные для моделирования кольцевой топологии сети SDH

Номер варианта	Расстояние между объектами, км			
	Главный офис – Филиал 1	Филиал 1 – Филиал 2	Филиал 2 – Филиал 3	Филиал 3 – Главный офис
1	500	1000	300	800
2	1000	500	900	900
3	300	900	500	700
4	600	400	300	500
5	900	600	800	600
6	1000	800	600	400
7	700	300	500	300
8	800	700	600	800
9	400	600	700	900
10	800	400	600	1000
11	600	800	1000	500
12	1000	500	800	400
13	900	1000	500	300
14	500	900	400	1000

7 Повторите пункт 5, сравните полученные результаты с предыдущими (по звездной топологии) и сделайте выводы.

8 Запустите моделирование. Через некоторое время, выбрав инструмент «Break/Restore» (кнопка 2 на рисунке 14), внесите неисправность в любом соединении между мультиплексорами (рисунок 17). Спустя некоторое время приостановите моделирование и повторите выполнение пункта 5. Сделайте вывод о том, повлияла ли неисправность в линии на процесс передачи данных.



Рисунок 17 – Моделирование аварии в сети

Содержание отчета

- 1 Ответ на контрольный вопрос.
- 2 Исходные данные для моделирования сети.
- 3 Модели сетей передачи данных, организованных по технологии SDH, со звездной и кольцевой топологиями.
- 4 Отчеты о результатах моделирования.
- 5 Вывод.

Контрольные вопросы

- 1 Топологии сети SDH и их особенности.
- 2 Особенности многоуровневой структуры построения сети SDH.
- 3 Преимущества технологии SDH.
- 4 Недостатки технологии SDH.
- 5 Назначение и применение мультиплексоров SDH.
- 6 Мультиплексор ОЛТ-10000, структура, назначение, используемые интерфейсы.
- 7 Мультиплексор ОЛТ-2500 Extra, структура, назначение, используемые интерфейсы.
- 8 Мультиплексор ОЛТ-155Д, структура, назначение, используемые интерфейсы.
- 9 Скорости передачи технологии SDH.
- 10 Синхронизация в сети SDH.
- 11 Особенности построения сети SDH по топологии «кольцо».

Практическая работа № 1

АНАЛИЗ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Цель работы: рассчитать и проанализировать теоретическую и фактическую пропускную способность оптического волокна в различных диапазонах длин волн.

Краткие сведения из теории

При распространении по волокну оптические сигналы теряют свою мощность. Это происходит по двум причинам:

- поглощение света;
- рассеяние света.

Поглощение света связано со свойствами материала и с рабочей длиной волны и происходит при возбуждении в материале электронных переходов и резонансов, которые преобразуют часть энергии света в теплоту. Поскольку такие явления связаны с частотой (или длиной волны) света, то и поглощение также зависит от длины волны света. В зависимости от длины волны различают поглощения в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах. Инфракрасное поглощение становится значительным на длинах волн свыше 1500 нм, а ультрафиолетовое – на длинах волн до 1400 нм. Кроме них в оптическом волокне существует также поглощение, определяемое примесями в материале волокна. Наибольший вклад в величину затухания дают примеси гидроксильной группы ОН.

Зависимость потерь в кварцевых оптических волокнах от длины волны света представлена на рисунке 1. Как видно из этого рисунка, потери ограничиваются: релеевским рассеянием, инфракрасным поглощением и резонансным поглощением ионов ОН («водяные» пики). Кривая носит иллюстративный характер, так как для разных типов волокон и разных производителей величина потерь может различаться. Наиболее сильно могут различаться потери в «водяных» пиках на $\lambda = 1290$ нм и 1383 нм. Так, в некото-

рых новых моделях одномодовых волокон отсутствует пик на $\lambda = 1383$ нм и снижена чувствительность к воздействию водорода.

Релеевское рассеяние уменьшается с увеличением длины волны ($\sim 1/\lambda^4$), а инфракрасное поглощение, наоборот, увеличивается. Абсолютный минимум потерь приходится на $\lambda = 1550$ нм. Для лучших образцов промышленных одномодовых волокон потери на этой длине волны составляют примерно 0,18 дБ/км.

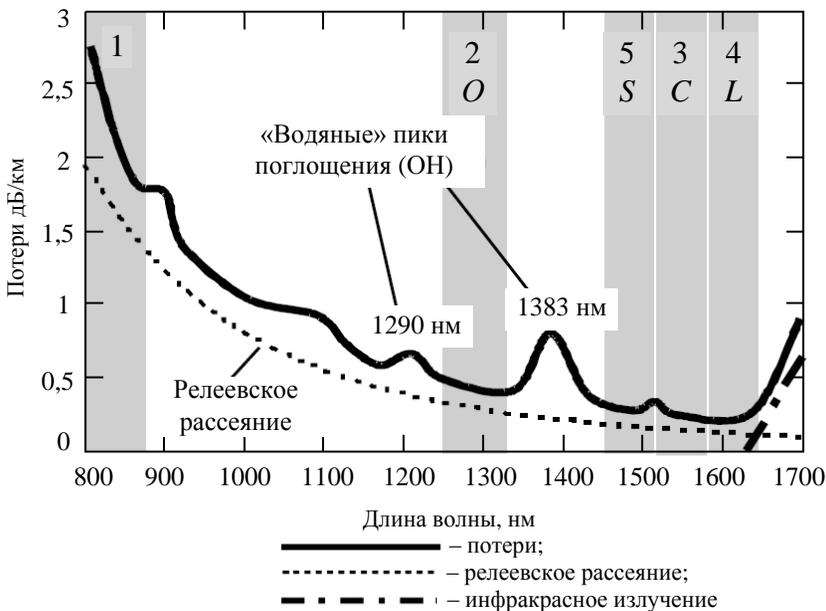


Рисунок 1 – Спектр потерь и положение окон прозрачности в кварцевых оптических волокнах

Как видно из рисунка 1, для передачи оптических сигналов может быть использован широкий участок спектра, где потери в волокнах достаточно малы. Его принято разбивать на более узкие участки – рабочие диапазоны, или окна прозрачности. Первоначально под окнами прозрачности понимались участки длин волн вблизи узких локальных минимумов в зависимости потерь от длины волны: 850 нм (1-е), 1310 нм (2-е), 1550 нм (3-е). Постепенно, с развитием технологии очистки кварцевого стекла, стала доступна вся область малых потерь от 1260 до 1675 нм. Кривая потерь теперь выглядит достаточно гладкой, и локальные минимумы на ней слабо выражены.

Первое окно прозрачности использовалось в 70-х годах в первых линиях связи на многомодовых волокнах. Диапазон длин волн этого окна про-

зрачности составляет 780–860 нм. В настоящее время из-за большой величины потерь в волокнах этот диапазон используется в основном в локальных вычислительных сетях.

Второе окно прозрачности (O), диапазон длин волн которого представлен в таблице 1, стало использоваться в 80-х годах для передачи оптических сигналов по одномодовым волокнам в линиях дальней связи. В настоящее время второе окно прозрачности используется преимущественно в городских и зонавых линиях.

Третье окно прозрачности (C) было освоено в начале 90-х годов, наиболее широко используется в магистральных линиях.

В последнее время с развитием систем с **мультиплексированием каналов по длинам волн (DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing)** третье и прилегающие к нему четвертое и пятое окна прозрачности вызывают повышенный интерес. В зарубежной литературе диапазоны длин волн, соответствующие этим трем окнам, получили специальные наименования: третье окно (C) – стандартный диапазон (Conventional band), четвертое окно (L) – длинноволновой диапазон (Long band), а пятое окно (S) – коротковолновой диапазон (Short band).

Четвертое окно прозрачности (L) позволяет передвинуть длинноволновую границу на 1625 нм.

Пятое окно прозрачности (S) появилось после создания волокна, в котором в результате тщательной очистки от посторонних включений потери в «водяном» пике на длине волны 1390 нм были снижены до 0,31 дБ/км, что меньше, чем во втором окне прозрачности на длине волны 1310 нм (0,35 дБ/км). Пятое окно прозрачности завершило освоение спектральной области малых потерь в волокне, простирающейся от 1260 до 1625 нм.

Таблица 1 – Спектральные диапазоны длин волн для одномодовых волокон

Обозначение диапазона	Наименование диапазона	Диапазон длин волн, нм
O	Основной	1260–1360
E	Расширенный	1360–1460
S	Коротковолновой	1460–1530
C	Стандартный	1530–1565
L	Длинноволновой	1565–1625
U	Сверхдлинноволновой	1625–1675

В связи с расширением рабочего диапазона оптических волокон Международным союзом электросвязи (МСЭ – от англ. *International Telecommunication Union*, ИТУ) были утверждены новые спектральные диапазоны в интервале от 1260 до 1675 нм (см. таблицу 1).

Американский ученый Гарри Найквист в 20-х годах прошлого века пришел к выводу, что существует некая предельная скорость передачи даже для идеальных каналов связи – их теоретическая пропускная способность. Для определения этой пропускной способности в настоящее время используют критерий Найквиста, который гласит, что число независимых импульсов в единицу времени, которые могут быть переданы через канал связи, ограничено удвоенной верхней (максимальной) частотой полосы пропускания этого канала:

$$V = 2\Delta F \cdot \log_2(M), \quad (1)$$

где ΔF – полоса пропускания канала, Гц, $\Delta F = F_{\text{в}} - F_{\text{н}}$;

$F_{\text{в}}$, $F_{\text{н}}$ – верхняя и нижняя частоты полос пропускания канала связи, Гц;

M – количество возможных уровней импульсов сигнала.

Если каждый импульс будет нести только один бит информации, т. е. иметь всего два возможных уровня ($\log_2(2) = 1$), то теоретическая пропускная способность канала связи будет определяться по формуле

$$V = 2\Delta F. \quad (2)$$

Для определения фактической пропускной способности канала связи используют формулу Шеннона, которая утверждает, что пропускная способность канала связи (теоретическая верхняя граница скорости передачи данных по каналу связи, подверженному аддитивному белому гауссовскому шуму) вычисляется по формуле

$$C = \Delta F \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}} \right), \quad (3)$$

где $P_{\text{с}}$ – полная мощность сигнала в полосе пропускания, Вт;

$P_{\text{ш}}$ – полная шумовая мощность в полосе пропускания, Вт.

Отношение мощности сигнала к мощности шума обозначается величиной ОСШ, которая может изменяться в очень большом диапазоне и чаще всего выражается через десятичный логарифм, умноженный на 10:

$$\text{ОСШ} = 10 \cdot \lg \left(\frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}} \right). \quad (4)$$

Единица такой логарифмической шкалы называется децибелом (дБ).

Например, ОСШ = 10 дБ означает, что мощность сигнала в 10 раз больше мощности шума, ОСШ = 20 дБ означает, что мощность сигнала в 100 раз больше мощности шума и т. д.

Для определения пропускной способности оптических волокон необходимо выполнять переход от привычных для оптических систем длин волн к частотам по известной формуле:

$$f = \frac{c}{\lambda}, \quad (5)$$

где f – частота, Гц;
 c – скорость света в вакууме, $3 \cdot 10^8$ м/с;
 λ – длина волны, м.

Порядок выполнения работы

1 Изучить краткие сведения из теории.

2 В соответствии с последней цифрой шифра выбрать из таблицы 2 диапазон длин волн для расчета теоретической и фактической пропускной способности оптического волокна.

Таблица 2 – Диапазоны длин волн для расчета пропускной способности оптического волокна

Последняя цифра шифра	Диапазон длин волн, нм	Последняя цифра шифра	Диапазон длин волн, нм
0	780–860 (первое окно прозрачности)	5	1460–1565 (третье и пятое окна прозрачности)
1	1260–1360 (второе окно прозрачности)	6	1460–1625 (третье, четвертое и пятое окна прозрачности)
2	1260–1460 (второе расширенное окно прозрачности)	7	1530–1675 (третье и четвертое расширенное окна прозрачности)
3	1530–1565 (третье окно прозрачности)	8	1460–1675 (третье, четвертое расширенное и пятое окна прозрачности)
4	1530–1625 (третье и четвертое окна прозрачности)	9	1260–1675 (вся область малых потерь)

3 В соответствии с первой цифрой шифра выбрать из таблицы 3 значение параметра ОСШ. В соответствии с последней цифрой шифра выбрать из таблицы 3 количество уровней сигнала (M).

4 Используя формулы (1) и (2), рассчитать теоретическую пропускную способность оптического волокна в заданном диапазоне длин волн.

5 Используя формулы (3) и (4), рассчитать фактическую пропускную способность оптического волокна в заданном диапазоне длин волн с учетом наличия в канале связи белого гауссовского шума.

Таблица 3 – ОСШ и количество уровней импульсов оптического сигнала для расчета пропускной способности оптического волокна

Первая цифра шифра	ОСШ, дБ	Последняя цифра шифра	Количество уровней
0	10	0	2
1	15	1	4
2	20	2	32
3	24	3	16
4	28	4	8
5	30	5	8
6	32	6	32
7	35	7	16
8	37	8	4
9	40	9	2

6 Построить график зависимости фактической пропускной способности оптического волокна в заданном диапазоне длин волн от величины ОСШ для всех предложенных в таблице 3 значений.

7 Определить эффективное количество возможных уровней импульсов оптического сигнала, приравняв теоретическую пропускную способность оптического волокна в заданном диапазоне длин волн к фактической (формулы (1) и (3)):

$$V = C;$$

$$2\Delta F \cdot \log_2(M) = \Delta F \cdot \log_2\left(1 + \frac{P_c}{P_{ш}}\right);$$

$$M = ?$$

8 Сравнить полученные результаты расчетов теоретической и фактической пропускной способности оптического волокна и сделать выводы.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Исходные данные для выполнения практической работы.
- 3 Расчет теоретической пропускной способности оптического волокна.
- 4 Расчет фактической пропускной способности оптического волокна.
- 5 График зависимости фактической пропускной способности оптического волокна в заданном диапазоне длин волн от величины ОСШ.

6 Расчет эффективного количества возможных уровней импульсов оптического сигнала.

7 Вывод по работе.

Контрольные вопросы

1 Причины затухания в оптоволокне.

2 Что такое Релеевское рассеяние?

3 Окна прозрачности.

4 Критерий Найквиста.

5 Формула Шеннона.

Практическая работа № 2

РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ БИТОВОЙ ОШИБКИ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ

Цель работы: определить и проанализировать вероятность битовой ошибки системы передачи информации с волоконно-оптическим кабелем в качестве среды передачи при заданных параметрах.

Краткие сведения из теории

Одним из важнейших критериев производительности цифровых систем связи является зависимость вероятности появления ошибочного бита $P_{\text{бит}}$ от отношения энергии сигнала, приходящейся на один бит, к спектральной плотности мощности аддитивного белого гауссовского шума $E_{\text{бит}}/N_0$. При этом предполагается, что единственным источником искажений сигнала является тепловой аддитивный белый гауссовский шум. Удобство использования отношения $E_{\text{бит}}/N_0$ вместо отношения мощности сигнала к мощности шума $P_c/P_{\text{ш}}$ состоит в том, что так удобнее сравнивать производительность цифровых систем на битовом уровне. Это важно для цифровых систем, поскольку сигнал может иметь произвольное n -битовое значение (один символ может кодировать n бит). Предположим, что для данной вероятности возникновения ошибки в цифровом двоичном сигнале требуемое отношение $P_c/P_{\text{ш}} = 20$. Поскольку двоичный сигнал имеет однобитовое значение, требуемое отношение $P_c/P_{\text{ш}}$ на бит равно 20. Пусть теперь сигнал является 1024-уровневым с теми же 20 единицами требуемого отношения $P_c/P_{\text{ш}}$. Теперь, поскольку сигнал имеет 10-битовое значение, требуемое отношение $P_c/P_{\text{ш}}$ на один бит равно 2. Параметр $E_{\text{бит}}/N_0$ характеризует отношение сигнал-шум, приходящееся на один бит.

Параметр $E_{\text{бит}}/N_0$ связан с параметром $P_c/P_{\text{ш}}$ следующим соотношением:

$$\frac{E_{\text{бит}}}{N_0} = \frac{P_c \cdot T_{\text{бит}}}{P_{\text{ш}} / \Delta F} = \frac{P_c / C}{P_{\text{ш}} / \Delta F} = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \cdot \frac{\Delta F}{C}, \quad (1)$$

где $E_{\text{бит}}$ – энергия сигнала, приходящаяся на один бит, Вт·с;

N_0 – спектральная плотность мощности шума, Вт/Гц;

$T_{\text{бит}}$ – время передачи одного бита, с;

ΔF – ширина полосы пропускания канала, Гц;

C – скорость передачи информации, бит/с.

Используя формулу Шеннона

$$C = \Delta F \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right), \quad (2)$$

можно выразить $P_c/P_{\text{ш}}$ через ширину полосы пропускания канала и скорость передачи информации:

$$\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} = 2^{\frac{C}{\Delta F}} - 1. \quad (3)$$

Тогда

$$\frac{E_{\text{бит}}}{N_0} = \frac{\Delta F}{C} \cdot \left(2^{\frac{C}{\Delta F}} - 1 \right). \quad (4)$$

В цифровой связи критерием качества является отношение мощности сигнала к мощности шума ($P_c/P_{\text{ш}}$), нормированное на ширину полосы пропускания канала и скорость передачи информации. Характер зависимости вероятности появления ошибочного бита ($P_{\text{бит}}$) от отношения $E_{\text{бит}}/N_0$ представлен на рисунке 1. Для цифровой системы связи, у которой соотношение $E_{\text{бит}}/N_0$ больше некоего значения x_0 , вероятность битовой ошибки будет меньше P_0 , соответствующей x_0 .

Для численной оценки вероятности битовой ошибки при различных видах модуляции существуют аналитические формулы.

Так, для **амплитудной модуляции (АМ) с двумя уровнями** (BASK – Binary Amplitude Shift Keying) такая аналитическая формула имеет вид:

$$P_{\text{бит}} = Q \left(\sqrt{\frac{E_{\text{бит}}}{N_0}} \right), \quad (5)$$

где $Q(x)$ – дополнительная функция ошибок (функция Лапласа)

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (6)$$

Для **фазовой модуляции (ФМ) с двумя уровнями** (BPSK – Binary Phase Shift Keying) такая аналитическая формула имеет вид:

$$P_{\text{бит}} = Q \left(\sqrt{\frac{2E_{\text{бит}}}{N_0}} \right). \quad (7)$$

Для относительно-фазовой модуляции (ОФМ) с двумя уровнями (DBPSK – Differential Binary Phase Shift Keying) такая аналитическая формула имеет вид:

$$P_{\text{бит}} = \frac{1}{2} e^{\left(\frac{E_{\text{бит}}}{2N_0} \right)}. \quad (8)$$

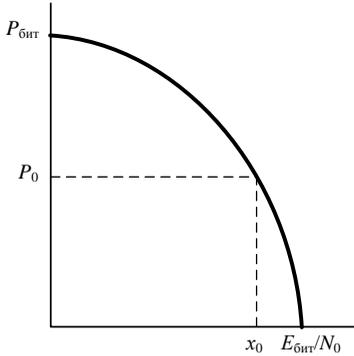


Рисунок 1 – Характер зависимости вероятности появления ошибочного бита от отношения $E_{\text{бит}}/N_0$

Количество уровней для многоуровневых видов модуляции обозначается одним или несколькими дополнительными символами в названии вида модуляции, например, четырехуровневая фазовая модуляция обозначается как QPSK (**Q**uadrature) или 4-PSK, восьмиуровневая – 8-PSK и т. д.

Для многоуровневых модуляций с M уровнями формулы для численной оценки вероятности битовой ошибки приведены ниже.

Многоуровневая фазовая модуляция:

$$P_{\text{бит}} = 2Q \left(\sqrt{\frac{2E_{\text{бит}} \log_2 M}{N_0} \sin \frac{\pi}{M}} \right), \quad (9)$$

где M – количество уровней сигнала.

Многоуровневая относительно-фазовая модуляция:

$$P_{\text{бит}} = 2Q \left(\sqrt{\frac{2E_{\text{бит}} \log_2 M}{N_0} \sin \frac{\pi}{2M}} \right). \quad (10)$$

Квадратурная амплитудная модуляция (КАМ, QAM – Quadrature Amplitude Modulation):

$$P_{\text{бит}} = \frac{2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right)}{\log_2 \sqrt{M}} \cdot Q \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 \sqrt{M}}{M-1} \cdot \frac{2E_{\text{бит}}}{N_0}} \right). \quad (11)$$

Порядок выполнения работы

1 Изучить краткие сведения из теории.

2 В соответствии с последней цифрой шифра из таблицы 2 предыдущей практической работы выбрать диапазон длин волн оптического сигнала и перевести его в диапазон частот.

3 В соответствии с цифрами шифра выбрать из таблицы 1 скорость передачи информации, вид модуляции и количество уровней, которые может принимать сигнал.

Таблица 2 – Скорости передачи информации, виды модуляции и количество уровней, которые может принимать оптический сигнал

Первая цифра шифра	Скорость передачи информации, бит/с	Последняя цифра шифра	Вид модуляции
0	155 520 000	0	BASK
1	622 080 000	1	BPSK
2	2 488 320 000	2	DBPSK
3	9 953 280 000	3	QPSK
4	39 813 120 000	4	DQPSK
5	155 520 000	5	8-PSK
6	622 080 000	6	D8PSK
7	2 488 320 000	7	16-QAM
8	9 953 280 000	8	64-QAM
9	39 813 120 000	9	256-QAM

4 Рассчитать по формуле (4) отношение энергии сигнала, приходящейся на один бит, к спектральной плотности мощности аддитивного белого Гауссовского шума.

5 Рассчитать вероятности бинарной ошибки цифровой системы передачи, используя формулы (5)–(11).

6 Построить график зависимости вероятности бинарной ошибки от соотношения $E_{\text{бит}}/N_0$ для заданного вида модуляции и сделать выводы.

Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Исходные данные для выполнения практической работы.

3 Расчет отношения энергии сигнала, приходящейся на один бит, к спектральной плотности мощности аддитивного белого гауссовского шума.

4 Расчет вероятностей бинарной ошибки цифровой системы передачи.

5 График зависимости вероятности бинарной ошибки от соотношения $E_{\text{бит}}/N_0$ для заданного вида модуляции.

6 Вывод по работе.

Контрольные вопросы

1 Связь энергии и мощности сигнала.

2 Виды модуляций и их различия.

3 Квадратурная амплитудная модуляция.

РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В РАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНИТЕЛЯХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Цель работы: оценить потери оптических сигналов в разъемных соединителях.

Краткие сведения из теории

Назначение **оптического соединителя (ОС)** – обеспечить прохождение света из одного элемента волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) в другой, внося при этом минимальные оптические потери на стыке. Оптический соединитель должен обеспечить параметры стыка не только в нормальных климатических условиях, но и при воздействии различных внешних факторов. Должна также обеспечиваться стабильность вносимых потерь на стыке при многократном соединении/разъединении (воспроизводимость соединения).

Документами, определяющими основные характеристики и параметры разъемов для всего мира, являются рекомендации МЭК (IEC). Основными рекомендациями МЭК для данного случая являются: IEC 60874 (для оптических разъемов) и IEC 61754 (для оптических интерфейсов). В рекомендации IEC 61300 приводятся методы испытаний и измерений параметров.

Наиболее важными параметрами оптических разъемов являются: вносимые потери и возвратные потери (потери на отражение).

Качество оптического разъема в первую очередь определяется величиной **вносимых потерь**:

$$\alpha = 10 \cdot \lg \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right). \quad (1)$$

где P_{in} – мощность оптического сигнала на входе соединителя;

P_{out} – мощность оптического сигнала на выходе соединителя.

Вносимые потери обычно зависят от типа волокна, типов и качества соединителей и составляют от 0,3 до 0,5 дБ.

Рассмотрим конструктивные факторы, влияющие на величину этих потерь, условно разделяемых на два вида: внешние и внутренние. К внешним факторам относятся зависимости вносимых потерь от несовершенства конструкции разъема.

Для соединителей одномодового волокна основное влияние на величину вносимых потерь оказывают следующие факторы:

1) осевое смещение L одного волокна относительно другого (рисунок 1) рассчитывается по аналитической формуле

$$\alpha_L = 4,34 \left(\frac{2L}{d_1 + d_2} \right)^2, \quad (2)$$

где L – величина осевого смещения, мкм;

d_1 – диаметр поля моды первого волокна, мкм;

d_2 – диаметр поля моды второго волокна, мкм;

2) угловое смещение осей соединяемых волокон оптических разъемов (рисунок 2):

$$\alpha_{\Theta} = -10 \cdot \lg e^{-\left(\frac{\pi(d_1 + d_2)m\Theta}{2\lambda} \right)^2}, \quad (3)$$

где Θ – угловое смещение осей волокон, град;

λ – длина волны, нм;

m – показатель преломления среды, заполняющей зазор.

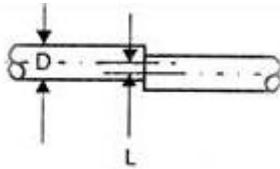


Рисунок 1 – Осевое смещение оптических волокон

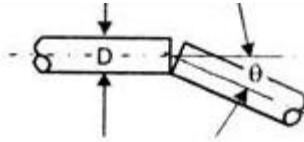


Рисунок 2 – Угловое смещение оптических волокон

В разъемах с одномодовыми оптическими волокнами основной причиной вносимого затухания является поперечное смещение одного волокна относительно другого. Угловое смещение также оказывает значительное влияние на вносимое затухание разъема.

Внутренние факторы, влияющие на величину оптических потерь разъема:

1) потери, вызванные неидеальностью соединяемых волокон (отличием диаметров их сердцевин и оболочек, различием их эллиптичности и концентричности). Данный вид потерь, дБ, сказывается только тогда, когда диаметр сердцевины «передающего» волокна больше диаметра сердцевины «принимающего» волокна, и определяется как:

$$\alpha_1 = 10 \cdot \lg \left(\frac{D_1}{D_2} \right), \quad (4)$$

где D_1, D_2 – диаметры сердцевины «передающего» и «принимающего» волокон, мкм;

2) потери, вызванные различием величины показателя преломления сердцевины волокон, а также профиля показателя преломления (ступенька, градиент), дБ. Они являются следствием Френелевского отражения и в слу-

чае стыковки волокон со ступенчатым профилем показателя преломления вычисляются как

$$\alpha_2 = -10 \cdot \lg \left(1 - 2 \left(\frac{n_1 + n_2 - 2n}{n_1 + n_2 + 2n} \right)^2 \right), \quad (5)$$

где n_1, n_2 – показатели преломления первого и второго волокон;

3) потери, вызванные различием апертур соединяемых волокон, дБ. Данный вид потерь возникает в случае, когда апертура «передающего» волокна NA_1 больше апертуры «принимающего» волокна NA_2 , и определяется как

$$\alpha_3 = 10 \cdot \lg \left(\frac{NA_1}{NA_2} \right)^2. \quad (6)$$

При $NA_1 < NA_2$ апертурные потери не возникают;

4) потери, связанные с различием диаметров модового поля стыкуемых волокон, дБ

$$\alpha_4 = 20 \cdot \lg \left[\left(\frac{2d_1 d_2}{d_1^2 + d_2^2} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

Внутренние факторы невозможно контролировать. Следует аддитивно учитывать все эти потери. Можно ожидать случайное изменение этих факторов даже в том случае, когда волокна одинакового стандарта или с одной и той же катушки. Эти факторы проявляются меньше на непрерывном сегменте оптического кабеля, так как они плавно меняются с длиной. На внутренние потери влияет технология производства волокна и соответствующие критерии контроля качества, а не конструктор соединителя. Зная разброс значений перечисленных выше параметров, можно определить максимальное значение внутренних потерь.

Возвратные потери (коэффициент обратного отражения) оптического разъема:

$$RL = -10 \cdot \lg \left(\frac{P_1}{P_2} \right), \quad (8)$$

где P_1, P_2 – мощность отраженного и прямого оптических сигналов.

Лучшими характеристиками обладает разъем с более высокими (по абсолютной величине), отрицательными возвратными потерями.

Основным фактором, определяющим эффект обратного отражения, является Френелевское отражение на границе раздела двух сред «кварц – воздух». Для уменьшения уровня возвратных потерь используют так называемую сферическую полировку оптических волокон. Уменьшение отражения

в этом случае происходит за счет более качественного плотного контакта между торцами волокон, а также из-за того, что обратное отражение будет направлено в сторону от оси разъема.

Порядок выполнения работы

1 Изучить краткие сведения из теории.

2 В соответствии с шифром из таблиц 1, 2 и 3 выбрать исходные данные для расчета потерь оптического сигнала в разъёмных соединителях оптических волокон.

Таблица 1 – Исходные данные первого волокна для расчета потерь оптического сигнала в разъёмных соединителях оптических волокон

Первая цифра шифра	d_1 , мкм	D_1 , мкм	NA_1	n_1
0	9,5	8,0	0,100	1,483
1	9,9	8,2	0,105	1,481
2	10,3	8,4	0,110	1,479
3	10,7	8,6	0,115	1,477
4	11,1	8,8	0,120	1,475
5	11,5	9,0	0,130	1,473
6	11,9	9,2	0,135	1,471
7	12,3	9,4	0,140	1,469
8	12,7	9,6	0,145	1,467
9	13,1	9,8	0,150	1,465

Таблица 2 – Исходные данные второго волокна для расчета потерь оптического сигнала в разъёмных соединителях оптических волокон

Последняя цифра шифра	d_2 , мкм	D_2 , мкм	NA_2	n_2
0	13,3	9,9	0,103	1,466
1	12,9	9,7	0,108	1,468
2	12,5	9,5	0,113	1,470
3	12,1	9,3	0,118	1,472
4	11,7	9,1	0,123	1,474
5	11,3	8,9	0,128	1,476
6	10,9	8,7	0,133	1,478
7	10,5	8,5	0,138	1,480
8	10,1	8,3	0,143	1,482
9	9,7	8,1	0,148	1,484

3 По формулам (2) и (3) рассчитать вносимые потери, вызванные осевым и угловым смещением оптических волокон в разъеме.

4 По формулам (4)–(7) рассчитать вносимые потери, вызванные внутренними факторами разъемов.

5 Вычислить суммарные потери оптического сигнала в разъемных соединителях оптических волокон.

6 Построить график зависимости потерь оптического сигнала в разъемных соединителях оптических волокон от величины осевого смещения одного волокна относительно другого в диапазоне от 0 до 2 мкм.

Таблица 3 – Длина волны, величины осевого и углового смещения, показатель преломления среды, заполняющей зазор в разветвителе

Последняя цифра суммы первой и последней цифр шифра	λ , нм	L , мкм	Θ°	n
0	1537,40	1,4	0,5	1,10
1	1538,98	1,2	1,5	1,09
2	1540,56	1,0	2,5	1,08
3	1542,14	0,8	3,5	1,07
4	1543,73	0,6	4,5	1,06
5	1545,32	0,5	5,0	1,05
6	1546,92	0,7	4,0	1,04
7	1548,51	0,9	3,0	1,03
8	1550,12	1,1	2,0	1,02
9	1551,72	1,3	1,0	1,01

7 Построить график зависимости потерь оптического сигнала в разъемных соединителях оптических волокон от величины углового смещения осей соединяемых волокон в диапазоне от 0 до 7°.

8 Построить график зависимости потерь оптического сигнала в разъемных соединителях оптических волокон из-за потерь, вызванных различием величины показателя преломления сердцевин волокон, а также профиля показателя преломления (ступенька, градиент) от показателя преломления среды, заполняющего зазор между волокнами в диапазоне от 1 до 2.

Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Исходные данные для выполнения практической работы.

3 Расчет вносимых потерь, вызванных осевым и угловым смещением оптических волокон в разьеме.

4 Расчет вносимых потерь вызванных внутренними факторами разъемов.

5 График зависимости потерь оптического сигнала в разъемных соединителях оптических волокон от величины осевого смещения одного волокна относительно другого.

6 График зависимости потерь оптического сигнала в разъемных соединителях оптических волокон от величины углового смещения осей соединяемых волокон.

7 Вывод по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Назначение и параметры оптических соединителей.
- 2 Внешние факторы, влияющие на потери в оптических соединителях.
- 3 Внутренние факторы, влияющие на потери в оптических соединителях.
- 4 Суть Френелевского отражения.

Практическая работа № 4

РАСЧЕТ КАСКАДА ОПТИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ EDFA

Цель работы: исследовать затухание волоконно-оптической линии связи, определить необходимость установки усилительных и регенерационных пунктов.

Краткие сведения из теории

Для компенсации затухания оптического сигнала по мере его прохождения по линии связи чаще всего используют оптические усилители построенные на **волокне, легированном эрбием** (EDFA – Erbium-Doped Fiber Amplifier). Данный вид усилителей имеет ряд преимуществ, которые обусловили их широкое распространение в последнее время. Во-первых, для работы данного класса усилителей не требуется подстройка под частоту передаваемого сигнала. Во-вторых, усиление ведется в широкой полосе частот. Эти преимущества позволяют легко наращивать емкость сети, не изменяя оборудования линий связи. В-третьих, для усиления сигнала не требуется его преобразование в электрическую форму. Также оптические усилители работают с сигналами любой формы и назначения. Но наряду со своими преимуществами оптические усилители имеют ряд особенностей, которые необходимо обязательно учитывать при проектировании волоконно-оптических линий связи.

Помимо оптических волокон затухания также вносят разъемные и неразъемные (сварные) соединения волокна. Поэтому необходимо учесть потери мощности сигнала при его вводе в волокно и обеспечить определенный технологический запас.

Суммарные потери A участка усиления линейного тракта можно определить по формуле

$$A = n_p \beta_p + n_n \beta_n + A_{\text{зап}} + \alpha_{\text{км}} L_y + \beta_{\text{вв}}, \quad (1)$$

где n_p – количество разъёмных соединений в линейном тракте;
 β_p – затухание в разъёмных соединениях, дБ;
 n_n – количество неразъёмных соединений на участке усиления

$$n_n = \frac{L_y}{L_{стр}} - 1, \quad (2)$$

L_y – длина участка усиления, км;
 $L_{стр}$ – строительная длина используемого ВОК, км;
 β_n – затухание в неразъёмном (сварном) соединении, дБ;
 $A_{зап}$ – необходимый энергетический запас мощности сигнала, связанный с потерями из-за старения элементов оптического тракта: источника излучения, волоконно-оптического кабеля, оптоэлектронного преобразователя, изменение параметров электрических схем, дБ;
 $\alpha_{км}$ – километрическое затухание оптического кабеля, дБ/км;
 $\beta_{вв}$ – потери при вводе оптической энергии в волокно, когда источник оптического излучения непосредственно подсоединяется к станционному кабелю, дБ.

В связи с тем, что

$$A = p_{пер} - p_{пр}, \quad (3)$$

где $p_{пер}$ – уровень сигнала на передающей стороне, дБ;

$p_{пр}$ – требуемый уровень сигнала на приемной стороне, дБ.

Тогда окончательная формула для расчета длины участка усиления примет следующий вид:

$$L_y = \frac{p_{пер} - p_{пр} - n_p \beta_p - A_{зап} - \beta_{вв} + \beta_n}{\alpha_{км} + \beta_n / L_{стр}}. \quad (4)$$

Расчитанная таким образом длина усилительного участка справедлива для обоих направлений передачи информации, если используется одинаковое оборудование с одинаковыми уровнями сигнала.

Расчет мощности шума, вносимого усилителем. Используемые оптические усилители имеют ряд отличительных особенностей. Одна из них состоит в том, что при отсутствии входного сигнала усилитель является источником спонтанного излучения фотонов, которое является шумом с мощностью $P_{ш ASE}$. Спонтанно образованные фотоны, распространяясь по волокну в активной зоне волоконно-оптического усилителя, тиражируются, в результате чего создаются вторичные фотоны на той же длине волны, с той же фазой, поляризацией и направлением распространения. Результирующий спектр спонтанных фотонов называется **усиленным спонтанным излучением** (ASE – amplified spontaneous emission). Его мощность нормируется в

расчете на 1 Гц и имеет размерность Вт/Гц. Если на вход усилителя подается полезный сигнал от лазера, то определенная доля энергетических переходов, ранее работавшая на усиленное спонтанное излучение, начинает усиливать выходной сигнал мощностью $P_{с\text{ вых}}$ под действием сигнала от лазера. Таким образом, происходит не только усиление полезного входного сигнала, но и ослабление ASE. Но, несмотря на это, необходимо все же учитывать шумы мощностью $P_{ш\text{ вых}}$, вносимые оптическими усилителями. Накопленный шум влияет на качество передаваемого сигнала, и в случае уменьшения величины **отношения сигнала к шуму** (ОСШ) (5) ниже требуемого уровня необходима регенерация сигнала.

$$\text{ОСШ} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{с\text{ вых}}}{P_{ш\text{ вых}}} \right). \quad (5)$$

Потому следует рассчитать максимально возможное количество усилителей оптического сигнала, расположенных между регенераторами.

Мощность усиленного одним оптическим усилителем спонтанного излучения можно найти по формуле

$$P_{ASE} = hf \frac{n_{sp}}{\eta} (G - 1), \quad (6)$$

где h – постоянная Планка, $h = 6,6252 \cdot 10^{-34}$ Вт·с²;

f – частота в соответствии с используемой длиной волны, Гц;

n_{sp} – коэффициент спонтанной эмиссии, $n_{sp} = 2$, поскольку распространяются две моды поляризации;

η – квантовая эффективность, $\eta = 1$;

G – коэффициент усиления усилителя.

Мощность шума усилителя для полосы частот, в которой осуществляется передача сигнала (Δf)

$$P_{ш\text{ ASE}} = P_{ASE} \Delta f. \quad (7)$$

Располагая вычисленными характеристиками шума, вносимого оптическим усилителем, можно найти их максимально возможное количество, при котором сохраняется требуемое ОСШ.

Расчет ОСШ. При передаче сигнала по волоконно-оптической линии связи с усилителями EDFA происходит накопление шумов. Данное явление обусловлено двумя факторами: усилением усилителями входного шума и добавлением к нему шума усиленного спонтанного излучения. Входным шумом для первого оптического усилителя является мощность шума нулевых флуктуаций, которым можно пренебречь.

Для нахождения ОСШ (по мощности) на выходе k -го усилителя используется формула

$$\text{ОСШ}_k = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{\text{с вых}}}{P_{\text{ш вых } k}} \right). \quad (8)$$

Начальная мощность шума на входе первого усилителя пренебрежительно мала. Потому можно считать $P_{\text{ш вых } 0} = 0$. С учетом этого мощность шума на выходе k -го усилителя

$$P_{\text{ш вых } k} = kP_{\text{ш ASE}}. \quad (9)$$

Абсолютный уровень шума на выходе k -го усилителя

$$P_{\text{ш вых } k} = 10 \cdot \log \left(\frac{kP_{\text{ш ASE}}}{P_0} \right), \quad (10)$$

где P_0 – нормированное абсолютное значение мощности сигнала нулевого уровня, $P_0 = 10^{-3}$ Вт.

Подставив выражение (9) в (8), получаем

$$\text{ОСШ}_k = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{\text{с вых}}}{kP_{\text{ш ASE}}} \right). \quad (11)$$

Для нахождения ОСШ как разницы уровней сигнала и шума формулу (11) можно записать в виде

$$\text{ОСШ}_k = p_{\text{пер}} - p_{\text{ш вых } k}. \quad (12)$$

По формуле (12) можно рассчитать отношение сигнал/шум на выходе оптической линии, содержащей несколько оптических усилителей и представить их в виде графика на рисунке 1, где k – порядковый номер усилителя.

Помимо этого, на рисунке 1 показаны уровни сигнала и шума после прохождения нескольких оптических усилителей, а также нормированное (минимальное) ОСШ. Эти результаты справедливы для двух направлений передачи информации. Видно, что с увеличением количества оптических усилителей возрастает уровень накопленного шума в линии. Это ведет к уменьшению отношения сигнал/шум. Для приведенного примера требуемое ОСШ (25 дБ) сохраняется на выходе линии с использованием шести оптических усилителей. Далее необходима регенерация сигнала, поскольку уровень накопленного шума превышает пороговое значение. Дальнейшее увеличение уровня шума приведет к снижению качества передаваемой информации.

Для примера, представленного на рисунке 1, длина регенерационного участка определяется по следующей формуле:

$$L_{\text{пр}} = 7L_{\text{y}}. \quad (13)$$

На выходе седьмого усилителя ОСШ ниже нормированного уровня, поэтому вместо седьмого усилителя необходимо устанавливать регенератор. И максимальное расстояние от аппаратуры передачи до регенератора или от одного регенератора до другого составит семь усилительных участков. Если по расчетам на линии связи необходимо установить один или несколько регенераторов, то целесообразно размещать их равномерно вдоль линии.

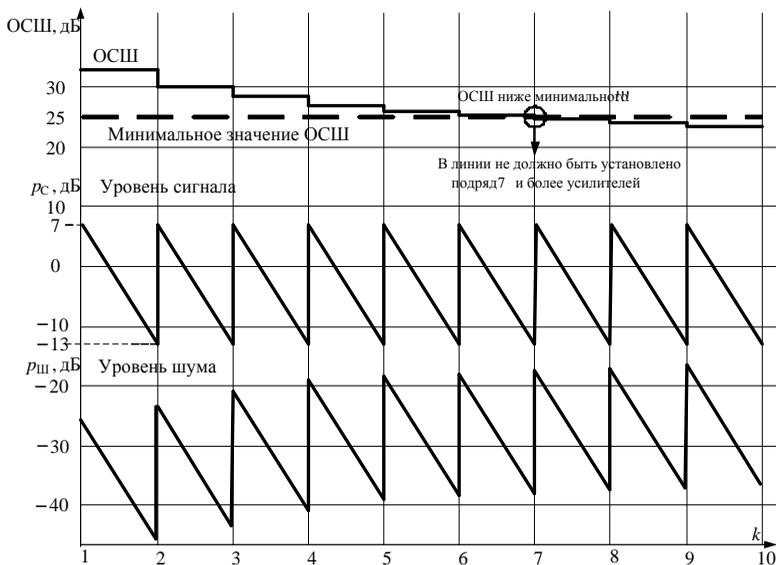


Рисунок 1 – ОСШ, P_c , $P_{ш}$ линии связи с несколькими оптическими усилителями

На рисунке 2 приведена структурная схема расположения линейного оборудования (усилители и регенераторы) волоконно-оптической линии связи для следующих исходных данных:

- протяженность волоконно-оптической линии связи, $L = 650$ км;
- длина усилительного участка, $L_y = 62,41$ км;
- длина регенерационного участка, $L_p = 436,87$ км.

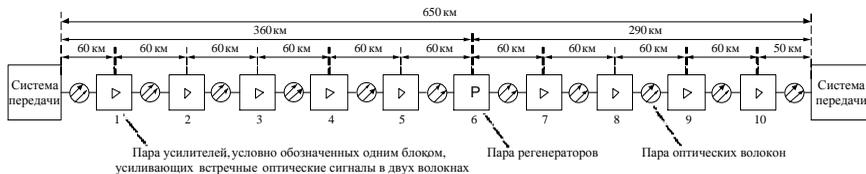


Рисунок 2 – Структурная схема расположения линейного оборудования волоконно-оптической линии связи

Порядок выполнения работы

1 Изучить краткие сведения из теории.

2 В соответствии с шифром выбрать исходные данные для расчета каскада оптических усилителей EDFA из таблицы 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета каскада оптических усилителей EDFA

Параметр	Первая цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Километрическое затухание волокна ($\alpha_{км}$), дБ/км	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29
Строительная длина кабеля ($L_{стр}$), км	6,5	6	5,5	5	4,5	4	3,5	3	2,5	2
Длина волны передачи оптического сигнала (λ), нм	1532,68	1540,56	1548,51	1556,55	1528,77	1550,12	1560,61	1552,52	1544,53	1536,61
Параметр	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Затухание в неразъемных соединителях (β_n), дБ	0,050	0,070	0,080	0,065	0,045	0,060	0,040	0,055	0,075	0,085
Полоса частот, в которой осуществляется передача сигнала (Δf), ГГц	100	50	200	100	50	50	100	200	50	100
Нормированное ОСШ, дБ	27	26,5	26	25,5	25	22,5	23	23,5	24	24,5

3 Принять следующие параметры для расчета каскада оптических усилителей EDFA:

- уровень сигнала на передающей стороне $p_{пер} = 7$ дБ;
- требуемый уровень сигнала на приемной стороне $p_{пр} = -13$ дБ;
- количество разъемных соединителей в линии связи $n_p = 2$;
- затухание в разъемном соединителе $\beta_p = 0,4$ дБ;
- необходимый энергетический запас мощности сигнала, связанный с потерями из-за старения элементов оптического тракта: источника излуче-

ния, волоконно-оптического кабеля, оптоэлектронного преобразователя и изменения параметров электрических схем, $A_{\text{зап}} = 3$ дБ;

– потери при вводе оптической энергии в волокно, когда источник оптического излучения непосредственно подсоединяется к стационарному кабелю, $\beta_{\text{вв}} = 2$ дБ.

4 Вычислить протяженность волоконно-оптической линии связи, км:

$$L = -\frac{N^3}{500} + \frac{N^2}{4} - 2N + 500, \quad (14)$$

где N – двузначный номер шифра.

5 По формулам (2)–(4) рассчитать длину усилительного участка.

6 Рассчитать частоту оптического сигнала в соответствии с используемой длиной волны:

$$f = \frac{c}{\lambda}, \quad (15)$$

где c – скорость света в вакууме, $3 \cdot 10^8$ м/с.

7 Рассчитать коэффициент усиления усилителя:

$$G = \frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{пр}}} = 10^{\frac{P_{\text{пер}} - P_{\text{пр}}}{10}}. \quad (16)$$

8 По формулам (5)–(12) рассчитать каскад оптических усилителей EDFA, результаты расчетов оформить в виде таблицы 2.

Таблица 2 – Результаты расчета каскада оптических усилителей EDFA

Номер усилителя	Уровень сигнала на входе усилителя, дБ	Уровень сигнала на выходе усилителя, дБ	Уровень шума на входе усилителя, дБ	Уровень шума на выходе усилителя, дБ	ОСШ, дБ
1	-13	7			
2	-13	7			
3	-13	7			
4	-13	7			
5	-13	7			
и т. д.	-13	7			

9 По результатам расчетов построить график в соответствии с образцом, представленным на рисунке 1. Графически определить и рассчитать по формуле (13) длину регенерационного участка волоконно-оптической линии связи.

10 По результатам расчетов составить структурную схему расположения линейного оборудования волоконно-оптической линии связи.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Результаты расчета каскада оптических усилителей EDFA в табличном и графическом виде.
- 3 Результаты расчета длины регенерационного участка волоконно-оптической линии связи.
- 4 Структурная схема расположения линейного оборудования волоконно-оптической линии связи.
- 5 Вывод по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Особенности EDFA-усилителей.
- 2 Как определяются суммарные потери?
- 3 Что такое ASE?
- 4 Причины накопления шумов в волоконно-оптической линии связи.

Практическая работа № 5

РАСЧЕТ ДИСПЕРСИИ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Цель работы: рассчитать дисперсию оптического сигнала и определить необходимые мероприятия по ее компенсации.

Краткие сведения из теории

Дисперсия – это явление уширения импульсов при передаче по оптическому волокну. Она имеет размерность времени и определяется как квадратичная разность длительностей импульсов на выходе и входе кабеля протяженностью L , км:

$$\tau(L) = \sqrt{\tau_{\text{вых}}^2 - \tau_{\text{вх}}^2}. \quad (1)$$

Обычно дисперсия нормируется в расчете на 1 км и измеряется в пс/(нм·км). В одномодовом волокне на распространение сигнала оказывают влияние как хроматическая, так и поляризационно-модовая дисперсия. Хроматическая дисперсия, в свою очередь, имеет две составляющие: материальную и волноводную. Материальная дисперсия обусловлена зависимостью показателя преломления волокна от длины волны. Волноводная – обусловлена зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны. Зависимость материальной и волноводной дисперсий от длины волны для стандартного одномодового волокна представлена на рисунке 1.

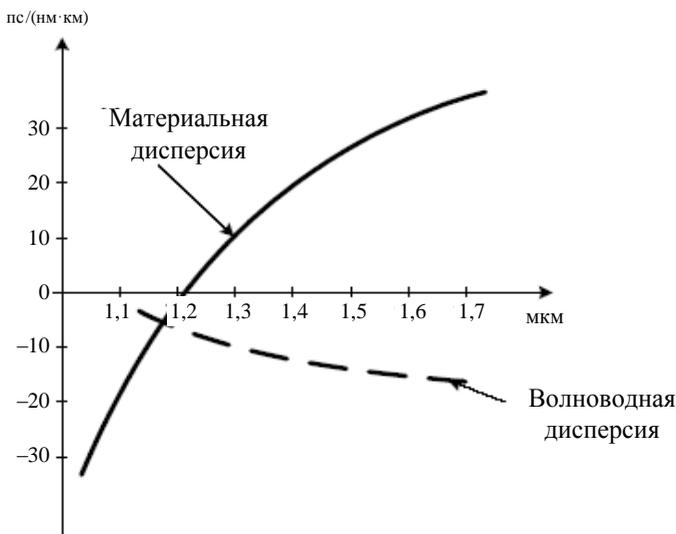


Рисунок 1 – Зависимость материальной и волноводной дисперсий от длины волны для стандартного одномодового волокна

Удельная хроматическая дисперсия вычисляется по формуле

$$\sigma = \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right], \quad (2)$$

где S_0 – наклон дисперсионной кривой одномодового волокна на длине волны нулевой дисперсии, пс/(нм²·км);

λ – рабочая длина волны, нм;

λ_0 – длина волны нулевой дисперсии, нм.

Значения удельной хроматической дисперсии, длины волны нулевой дисперсии и наклона дисперсионной кривой на длине волны нулевой дисперсии определяются положениям стандартов ИТУ-Т G.652–655 (таблица 1).

Все оптические волокна делятся на две основные группы: многомодовые (Multi Mode Fiber – MMF) и одномодовые (Single Mode Fiber – SMF).

Многомодовые волокна. Если диаметр сердечника много больше длины волны оптической несущей, то импульс света, распространяющийся в нем, состоит из многих составляющих, распространяемых в отдельных модах оптического волокна. Каждая мода возбуждается на входе световода под своим определенным углом ввода и направляется по сердечнику по своей траектории. Такой тип оптического волокна называется многомодовым. Моды проходят разные расстояния оптического пути и поэтому приходят на

выход оптического волокна в разное время, что вызывает уширение оптических импульсов, называемое межмодовой дисперсией.

Таблица 1 – Дисперсионные характеристики оптических волокон

Характеристики одномодовых оптических волокон	Стандартное SM	Со смещенной дисперсией DSF	С минимизацией затухания CSF	С ненулевой смещенной дисперсией NZDSF
	ITU-T G.652	ITU-T G.653	ITU-T G.654	ITU-T G.655
Удельная хроматическая дисперсия, пс/(нм·км), при длине волны: 1285–1330 нм 1550 нм 1530–1565 нм 1525–1575 нм	$\leq 3,5$ ≤ 18 – –	– – – $\leq 3,5$	– ≤ 20 – –	– – 1,0–6,0 –
Диапазон длин волн при нулевом значении дисперсии, нм	1300–1325	1525–1575	1260–1300	–
Максимальный наклон дисперсионной кривой в точке её нулевого значения, пс/(нм ² ·км)	$\leq 0,092$	$\leq 0,085$	$\leq 0,095$	–

Одномодовые волокна. Искажений, которые характерны для многомодовых оптических волокон, можно избежать, если подобрать их структурные параметры таким образом, чтобы в волокне распространялась одна единственная – основная мода. Такие волокна называются одномодовыми.

Межмодовая дисперсия в одномодовом оптическом волокне отсутствует. Однако основная мода также уширяется во времени по мере прохождения по такому световоду.

Для кварцевых оптических волокон минимум затухания соответствует длине волны 1550 нм, но при скоростях передачи порядка нескольких Гбит/с дальность связи на этой длине волны может ограничиваться хроматической дисперсией, поэтому для ее снижения осуществляется выбор соответствующего профиля показателя преломления.

Одномодовые волокна со смещенной дисперсией. Стандартное одномодовое оптическое волокно не обеспечивает малой дисперсии для длины волны 1550 нм, поэтому были разработаны оптические волокна со смещенной дисперсией (Dispersion-Shifted Fiber – DSF), которые отличаются конфигурацией профиля показателя преломления.

Основой для создания оптических волокон со смещенной дисперсией является ее отрицательная волноводная дисперсия. Делая волноводную дисперсию большой и отрицательной, можно скомпенсировать материальную дисперсию и сдвинуть нулевую дисперсию в длинноволновую область (рисунок 2). Сдвиг достигается уменьшением диаметра сердечника ОВ, увеличением оптической разности показателя преломления и конфигурацией профиля показателя преломления.

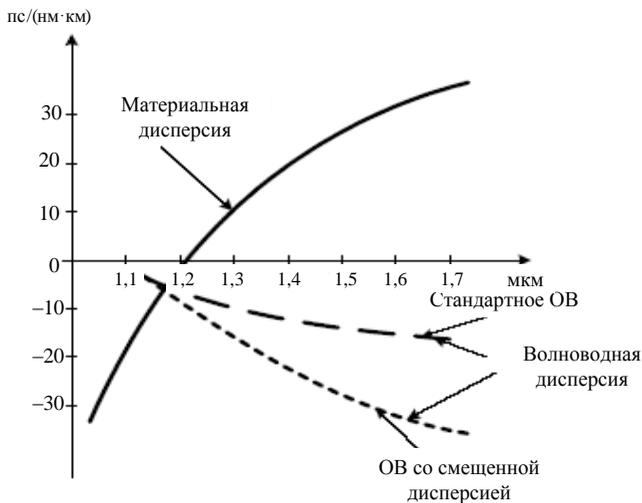


Рисунок 2 – Отличие волноводной дисперсии в стандартном оптическом волокне и в оптическом волокне со смещенной дисперсией

Зависимость дисперсии от длины волны оптического излучения различных одномодовых оптических волокон показана на графике (рисунок 3).

Из графика видно, что хроматическая дисперсия у стандартного ОВ на длине волны 1550 нм составляет около 18 пс/(нм·км). Оптические потери у одномодовых волокон на длине волны 1550 нм приблизительно в два раза меньше, чем потери на длине волны 1310 нм. Сдвиг длины волны нулевой дисперсии на длину волны 1550 нм позволяет извлечь выгоду из этих малых оптических потерь и получить при этом меньшие искажения импульсов.

Одномодовые волокна с минимизацией затухания. Одномодовые волокна с минимизацией затухания (Conventional Single-mode Fiber – CSF) имеют нулевую дисперсию при длине волны около 1300 нм с минимальным уровнем потерь. При длине волны около 1550 нм данное одномодовое оптическое волокно имеет смещенную дисперсию и отсечку. Оно оптимизировано для использования в диапазоне длин волн 1530–1625 нм. Одномодовое волокно с минимизацией затухания, имеющее очень малые потери, мо-

жет использоваться в приложениях для цифровой передачи на большие расстояния, таких как наземные системы дальней связи и магистральные подводные кабели с оптическими усилителями.

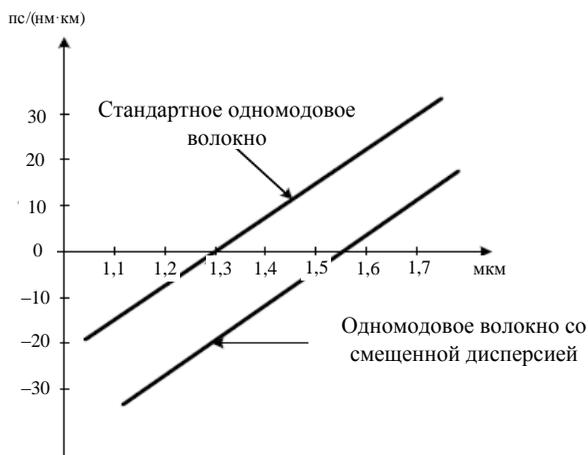


Рисунок 3 – Зависимость дисперсии от длины волны оптического излучения различных одномодовых оптических волокон

Одномодовые волокна с ненулевой смещенной дисперсией. В системах с мультиплексированием каналов по длинам волн (DWDM) и с оптическим усилением компенсация дисперсии представляет более сложную задачу, так как мощность оптических усилителей достаточна для того, чтобы создавать нелинейные эффекты в одномодовом оптическом волокне. Использование одномодовых оптических волокон со смещенной дисперсией решает проблемы, связанные с хроматической дисперсией на длине волны 1550 нм, однако оно не подходит для использования в DWDM-системах из-за ряда нелинейных явлений. Поэтому второй целью компенсации хроматической дисперсии является ограничение искажений, вызываемых этими нелинейными явлениями. Снижение влияния нелинейных эффектов может быть достигнуто наличием в оптическом волокне небольшого (ненулевого) уровня хроматической дисперсии. Поэтому было разработано одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией (Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber, NZDSF).

Волокна NZDSF дают возможность работать в значительно более широком диапазоне длин волн благодаря тому, что в результате ряда усовершенствований кривая зависимости дисперсии от длины волны у этих волокон более гладкая и пологая. Гладкость и пологость этой кривой улучшают характеристики волокна из-за того, что исключается необходимость решения сложной проблемы компенсации дисперсии.

Хроматическая дисперсия волокна рассчитывается по формуле

$$\tau_{\text{хр}} = \sigma \Delta \lambda L, \quad (3)$$

где σ – удельная хроматическая дисперсия;

$\Delta \lambda$ – ширина спектра передаваемого оптического сигнала;

L – длина волоконно-оптической линии связи.

Ширину спектра передаваемого сигнала можно рассчитать по формуле:

$$\Delta \lambda = \frac{c \Delta f}{f^2} = \frac{\lambda^2 \Delta f}{c}, \quad (4)$$

где Δf – ширина полосы спектра передаваемого сигнала;

f – частота, на которой осуществляется передача информации;

c – скорость света;

λ – длина волны, на которой осуществляется передача информации.

Необходимо свести хроматическую дисперсию к минимуму и этим обеспечить необходимый технологический запас на старение волокна.

Наиболее распространены два способа борьбы с дисперсией. Первый из них – это регенерация оптического сигнала, осуществляемая путем преобразования сигнала в электрическую форму, его регенерации и обратного преобразования в оптическую форму. Для группового DWDM сигнала необходимо демультиплексировать сигнал на отдельные каналы и установить на каждый канал отдельный регенератор. После регенерации необходимо снова провести мультиплексирование всех передаваемых длин волн. Очевидно, что использование подобных регенераторов выгодно только в точке приема передаваемого сигнала. Применение таких регенераторов для компенсации дисперсии экономически не выгодно.

Второй способ борьбы с дисперсией не предусматривает преобразования в электрическую форму. Для компенсации дисперсии используются волокна, имеющие отрицательное значение хроматической дисперсии. Модуль удельной дисперсии такого волокна намного больше, чем у стандартного одномодового. Потому для компенсации дисперсии требуется намного меньший отрезок волокна, чем длина участка линии связи. Компенсация дисперсии производится путем вставки в кабель модуля с волокном компенсации дисперсии. **Модули компенсации дисперсии (DCM)** поставляются вместе с оборудованием. Использование такого метода не требует демультиплексирования составного оптического сигнала. Также следует отметить, что данный метод борьбы с дисперсией не накладывает никаких ограничений на скорость и форму передаваемого сигнала.

Для компенсации хроматической дисперсии используют волокно со следующими параметрами: $S_0 = 0,75$ пс/(нм²·км); $\lambda_0 = 1750$ нм.

Используя формулы (2) и (3), найдем длину волокна, необходимую для компенсации хроматической дисперсии всей линии связи:

$$L_k = \frac{-\tau_{xp}}{\frac{\Delta\lambda S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right]} \quad (5)$$

Оптимальным будет установка нескольких модулей компенсации, которые включаются между каскадами оптических усилителей платы оптического интерфейса. Так, минимизируется влияние затухания волокна компенсации дисперсии на передаваемый сигнал. Два модуля DCM можно установить на оконечных пунктах волоконно-оптической линии связи, а остальные – совместно с оптическими усилителями. Хроматическая дисперсия одного такого модуля составляет

$$\tau_k = L_k \cdot \frac{\Delta\lambda S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right] \quad (6)$$

На рисунке 4 приведен график изменения хроматической дисперсии оптического сигнала на протяжении волоконно-оптической линии связи для структурной схемы, предложенной в качестве примера в предыдущей практической работе. Регенератор производит оптико-электрическое преобразование с сигналом, поэтому дисперсию на участке волоконно-оптической линии связи до регенератора необходимо компенсировать до нуля, как и до приемной системы передачи.

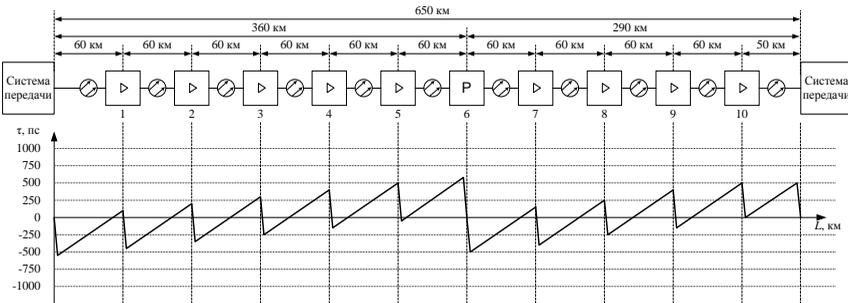


Рисунок 4 – График изменения хроматической дисперсии оптического сигнала на протяжении волоконно-оптической линии связи

Для построения графика на рисунке 4 приняты следующие исходные данные:

- протяженность волоконно-оптической линии связи, $L = 650$ км;
- хроматическая дисперсия на участке волоконно-оптической линии связи протяженностью 60 км, $\tau_{xp}(60) = 650,57$ пс;

– хроматическая дисперсия на участке волоконно-оптической линии связи протяженностью 50 км, $\tau_{кр}(50) = 542,14$ пс;

– хроматическая дисперсия одного модуля компенсации на участке до регенератора, $\tau_{к1} = 557,57$ пс;

– хроматическая дисперсия одного модуля компенсации на участке после регенератора, $\tau_{к2} = 524$ пс.

Порядок выполнения работы

1 Изучить краткие сведения из теории.

2 В соответствии с шифром выбрать из таблицы 2 наклон дисперсионной кривой одномодового волокна на длине волны нулевой дисперсии и длину волны нулевой дисперсии.

Таблица 2 – Исходные данные для расчета дисперсии оптического сигнала

Первая цифра шифра	Наклон дисперсионной кривой одномодового волокна на длине волны нулевой дисперсии (S_0), пс/(нм ² ·км)	Последняя цифра шифра	Длина волны нулевой дисперсии (λ_0), нм
0	0,068	0	1260
1	0,071	1	1270
2	0,074	2	1280
3	0,077	3	1290
4	0,080	4	1300
5	0,083	5	1305
6	0,086	6	1310
7	0,089	7	1315
8	0,092	8	1320
9	0,095	9	1325

3 Используя исходные данные предыдущей практической работы, в соответствии с шифром рассчитать удельную хроматическую дисперсию, ширину спектра передаваемого сигнала и хроматическую дисперсию по формулам (2)–(4).

4 Разделить волоконно-оптическую линию связи на подучастки, которые ограничиваются оконечными системами передачи и регенераторами. Для каждого подучастка определить количество модулей компенсации дисперсии, которые будут устанавливаться на всех усилителях, а также на устройствах, ограничивающих подучастки (системы передачи и регенераторы).

5 Используя формулы (5) и (6), рассчитать дисперсию модулей компенсации и всех элементарных отрезков волоконно-оптической линии связи между ними для каждого из подучастков волоконно-оптической линии связи.

6 Построить график изменения хроматической дисперсии оптического сигнала на протяжении волоконно-оптической линии связи, совмещенный со

структурной схемой расположения линейного оборудования, составленной в предыдущей практической работе.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Результаты расчета удельной хроматической дисперсии, ширины спектра передаваемого сигнала и хроматической дисперсии оптического сигнала.
- 3 Результаты расчета дисперсии модулей компенсации и всех элементарных отрезков волоконно-оптической линии связи между ними для каждого из подучастков волоконно-оптической линии связи.
- 4 График изменения хроматической дисперсии оптического сигнала на протяжении волоконно-оптической линии связи, совмещенный со структурной схемой расположения линейного оборудования.
- 5 Вывод по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое дисперсия оптического сигнала?
- 2 Виды дисперсии.
- 3 Назначение оптических волокон со смещенной дисперсией.
- 4 Назначение оптических волокон с ненулевой смещенной дисперсией.
- 5 Способы борьбы с дисперсией.

Практическая работа № 6

РАСЧЕТ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ СВЯЗИ xPON

Цель работы: организовать магистральный участок пассивной оптической сети для заданной группы абонентов с выбором типа сети, ее топологии и необходимого оборудования.

Краткие сведения из теории

Потребность развития инфраструктуры широкополосного доступа на основе экономичных оптических технологий, использующих принцип «волоконно в квартиру» или «волоконно в офис» (FTTH – Fiber To The Home) указывает на необходимость внедрения технологии пассивных оптических сетей (xPON – Passive Optical Network), применение которой позволяет решить эти проблемы.

Данная технология предусматривает построение сети доступа с большой пропускной способностью при минимальных капитальных затратах. Такое решение предполагает создание разветвленной сети без активных компонентов – на пассивных оптических разветвителях.

Информация для всех пользователей передается одновременно с временным разделением каналов от оптического линейного терминала (OLT – Optical Line Terminal) до конечных оптических сетевых блоков (ONT – Optical Network Terminal или ONU – Optical Network Unit), расположенных у самого абонента.

Передача и прием в обоих направлениях производится, как правило, по одному оптоволокну (ОВ), но на разных длинах волн.

Оптическая мощность с выхода OLT в узлах сети делится (равномерно или неравномерно) таким образом, чтобы уровень сигнала на входе всех ONT/ONU был примерно одинаков.

В случае, когда одна из длин волн (чаще всего 1550 нм) выделяется всем абонентам для передачи телевизионного сигнала, в узле связи устанавливается оптический мультиплексор WDM (Wavelength-Division Multiplexing) для объединения передаваемых сигналов на длинах волн 1490 нм (голос, данные) и 1550 нм (видео). В обратном направлении сигнал (голос, данные) передается на длине волны 1310 нм.

Пассивные оптические сети подразделяются на следующие типы:

- BPON – широкополосная PON;
- GPON – Gigabit PON;
- EPON – Ethernet PON.

Сеть по технологии xPON состоит из трех основных участков (рисунок 1):

– станционный участок – это активное оборудование OLT, WDM мультиплексор и оптический кросс высокой плотности (ODF – Optical Distribution Frame), смонтированные на узле связи;

– линейный участок – это совокупность волоконно-оптических кабелей (ВОК), шкафы, коробки, сплиттеры, коннекторы и соединители, располагающиеся между станционным и абонентским участком (участок между ODF и оптической распределительной коробкой (ОРК) (см. рисунок 1);

– абонентский участок – это персональная абонентская разводка одноволоконным ВОК (реже двухволоконным или четырехволоконным) от элементов общих распределительных устройств до оптической розетки и активного оборудования ONT в квартире абонента; или до группового сетевого узла ONU, смонтированного в офисе корпоративного клиента (участок между ОРК–ONT (см. рисунок 1).

В случае, когда ОРК и/или ответвитель этажный (ОЭ) не используются (например, для одноэтажного здания, когда используется только ОРШ), линейный и абонентский участки ограничиваются ODF–ОРШ и ОРШ–ONT соответственно.

Станционный участок. OLT располагается в помещении узла связи, район обслуживания которого определяет зону охвата сетью xPON. Активное станционное оборудование xPON, в качестве которого выступает OLT, связывает конечное оборудование абонентов с сетью Интернет и другими источниками услуг по передаче голоса, данных и видео.

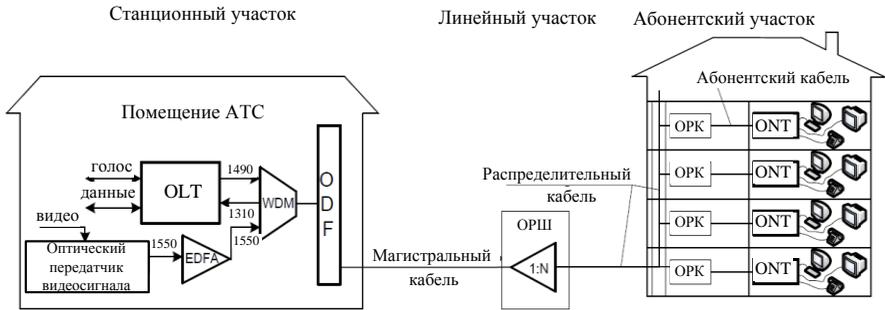


Рисунок 1 – Схема пассивной оптической сети

Линейные порты xPON оборудования OLT подключаются к ODF с помощью оптических шнуров (патч-кордов) или оконцованных микрокабелей (предтерминированных производителями заказных наборов ВОК).

Оптический кросс предназначен для распределения ВОК по направлениям, перекрестировки (коммутации) и соединения со станционным ВОК через сплайс-пластины (кассеты и боксы для сварных соединений).

В случае использования на xPON двухкаскадной схемы размещения сплиттеров первый каскад с малым коэффициентом ветвления (1:2, 1:4) следует устанавливать непосредственно в ODF.

Оптический кросс должен располагаться в том же помещении узла связи (автозал, цех, кросс), где и размещается стойка с OLT.

Линейный участок. Линейный участок, для строительства которого требуется произвести разнообразные трудоемкие строительные-монтажные работы для установки большого количества пассивного оборудования, требует наиболее внимательного подхода для оптимального его построения. Линейный участок определяет итоговую топологию xPON.

В сети xPON от ОРШ до оконечных устройств абонентов (ONT, ONU) связь осуществляется через пассивные оптические разветвители (сплиттеры), которые устанавливаются в ОРК и/или ОРШ.

На сети может быть использована как одноуровневая (однокаскадная) схема включения сплиттеров без последовательного их включения друг за другом (рисунок 2), так и многокаскадная схема с последовательным их размещением (рисунок 3). Количество уровней каскадирования сети зависит от суммарного вносимого затухания сплиттеров, коэффициента ветвления xPON интерфейсов OLT (у GPON это 1:64) и требований к полосе пропускания для каждого абонента. Чем меньше количество уровней каскадирования сплиттеров, тем проще сеть абонентского доступа и, соответственно, больше возможностей быстрого устранения неисправностей, повышения качества связи за счет исключения возможных переходных искажений на многоступенчатой передаче сигналов.

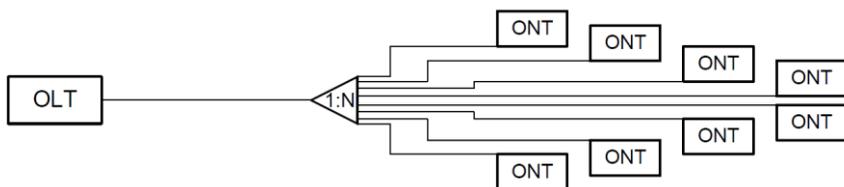


Рисунок 2 – Одноуровневая схема включения сплиттеров

Использование в архитектуре сети многокаскадной схемы с последовательным размещением позволяет более гибко расположить распределительные устройства и ВОК, т. е. оптимально построить сеть xPON.

Линейный участок состоит:

- из магистрального участка – это ВОК, прокладываемый в каналах кабельной канализации или в грунте от кросса ODF в узле связи в направлении территории с большой группой зданий (район, квартал) и завершающийся ОРШ;
- распределительного участка – это ВОК, прокладываемый от ОРШ до ОРК преимущественно внутри зданий по вертикальным стоякам.

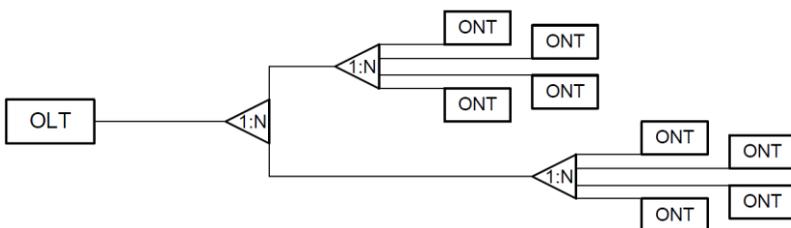


Рисунок 3 – Многоуровневая схема включения сплиттеров

Магистральный участок сети xPON является одним из основных элементов всей пассивной оптической сети. Правильный выбор системы построения сети и ее топологии, определение условий и принципов организации доступа позволяют оптимизировать затраты на развитие сети в дальнейшем.

На участке сети xPON от узла связи до ОРШ, находящегося в зоне его обслуживания, производится магистральное распределение ОВ.

Оптический распределительный шкаф входит в состав магистрального участка сети xPON. В ОРШ централизованно размещаются группы сплиттеров, разветвляющие одно магистральное ОВ на 16 или 32 ОВ распределительного кабеля (для ВРОН, ЕРОН), реже – на 64 (для GРОН).

Главная функция ОРШ – это переход от длинного магистрального участка к короткому распределительному участку со сменой типов ВОК и

одновременным значительным увеличением емкости ОВ, доступного к подключению абонентов. В ОРШ также производится коммутация ОВ, их оптимизация, измерения магистрали до узла связи и диагностика абонентских подключений. ОРШ монтируется внутри здания или на улице (при обслуживании группы зданий).

Главная задача магистрального участка – подвести требуемое количество оптических волокон максимально близко к сконцентрированной группе абонентов наиболее оптимальным образом с учетом топологии и емкости кабельной канализации.

В зависимости от удаленности подключаемых к магистрали зданий, количества потенциальных абонентов в них, характера постройки (высотные или малоэтажные), особенностей городской застройки (жилые кварталы, исторический центр, офисы, промзона) и возможностей по прокладке ВОК по территории и размещению оборудования непосредственно в этих зданиях, различают два вида магистрального участка:

- зона прямого питания;
- шкафной район.

Зона прямого питания – это территория вокруг узла связи в радиусе до двух километров с плотной высотной застройкой (например, спальный район с узлом связи в центре), где развита инфраструктура телефонной канализации и нет острого дефицита в свободных кабельных каналах от узла связи и между домами.

Для прокладки в зоне прямого питания должен использоваться ВОК высокой и средней емкости (32, 48 или 64 ОВ), имеющий модульную структуру. Модульную кабель позволяет подключить к одной магистрали несколько рядом стоящих зданий с помощью последовательности муфт с ответвлением по одному модулю на здание без разрезания транзитных модулей. Такой способ прокладки позволяет значительно оптимизировать как оптический бюджет линии, так и общую стоимость сварочных работ, перекрывая по эффективности составные ВОК с последовательным уменьшением емкости от муфты к муфте. Количество оптических волокон в одном модуле может быть: 4, 6, 8, 10, 12 или 16.

Количество волокон в одном модуле и общее количество волокон в кабеле выбираются с таким расчетом, чтобы в кабеле оказалось целое количество модулей и ни одно волокно не осталось в модуль не включенным.

Общий принцип вычисления количества требуемых ОВ на одно здание – по два ОВ на каждые 32 (ВРОН, GРОН) или 64 (ЕРОН) квартиры (одно ОВ в нагрузку, второе – в резерве). Наличие в жилом доме офисного помещения с отдельным входом должно приниматься за одну квартиру. Однако общее количество ОВ, проектируемое на каждое конкретное здание, должно рассчитываться с учетом планируемого процента абонентов, подключенных по технологии xРОН от общего количества абонентов. Общий принцип расчета

требуемых ОВ приведен для случая использования разветвителей сети xPON с максимальным делением на 32.

Шкафной район – это территория не плотной и/или не высотной застройки (район индивидуальной застройки), расположенная от узла связи на расстоянии от двух и более километров, где имеется острый дефицит в свободных кабельных каналах на значительных дистанциях.

Для прокладки от узла связи до группы шкафов должен использоваться ВОК средней или малой емкости (16, 24, 32 или 48 ОВ), имеющий модульную структуру. Аналогично зоне прямого питания кабель на 48 ОВ, состоящий из четырех модулей по 12 ОВ, позволяет подключить к одной магистрали четыре последовательно расположенных уличных ОРШ с помощью муфт с ответвлением одного модуля на шкаф без разрезания транзитных модулей.

С учетом типоразмеров ВОК, наиболее целесообразная емкость ОРШ находится в пределах до 580 абонентских подключений. При этом следует учитывать сложность монтажа, габариты и трудоемкость обслуживания шкафов большой емкости. При емкости ОРШ в 480 абонентов к нему следует подводить 24 ОВ (16 ОВ в нагрузке плюс 8 ОВ в резерве). При этом следует использовать типовой шкаф одной емкости в пределах всей сети xPON.

Общее количество ОВ для подключения абонентов данного района должно рассчитываться с учетом планируемого процента абонентов сети xPON от общего количества абонентов.

Распределительный участок сети xPON – это участок от ОРШ или подъездных ОРК до этажных распределительных элементов сети в многоэтажных жилых зданиях. Распределительный ВОК выходит из ОРШ и прокладывается внутри зданий по вертикальным стоякам или в металлорукаве (поливинилхлоридной трубе) по лестничным клеткам, от подвального до чердачного помещения через все этажи здания (направление выбирается по месту).

Ответвитель этажный (ОЭ) предназначен для ответвления из межэтажного ВОК волокон, обслуживающих этаж, фиксации межэтажного ВОК и транспортных трубок, защиты места ответвления. ОЭ используется совместно с межэтажными ВОК с сердечником свободного доступа.

Оптическая распределительная коробка используется для подключения квартиры абонента к вертикальному распределительному участку здания на этаже с применением оптических разъемов. Как правило, ОРК разных производителей имеют емкость от 6 до 12 абонентских подключений. Применение ОРК меньшей емкости приводит к значительному удорожанию проекта в целом, увеличивая их общее количество и стоимость монтажа. Применение ОРК большей емкости не целесообразно в силу сложившейся практики жилой застройки – более 12 квартир на этаж в многоквартирных жилых домах не встречается.

При проектировании распределительного участка любого здания с применением ОРК следует придерживаться следующего правила: одна коробка на каждый этаж.

В распределительный участок входят:

- участок сети от уличного ОРШ до кабельного ввода в жилой дом;
- распределительные устройства непосредственно в жилом доме.

Основным способом поэтажных горизонтальных ответвлений от межэтажного вертикального ВОК является классическая схема с ОРК, размещаемых на каждом этаже.

При проектировании распределительного участка в доме следует предусматривать емкость вертикального ВОК с учетом 100%-ного подключения абонентов. Следует использовать ВОК емкостью, наиболее близкой к количеству квартир в подъезде с учетом возможного запаса ОБ. На каждом этаже должно быть предусмотрено необходимое количество ответвлений, достаточное для подключения всех квартир на этаже. Запрещается использование составного вертикального ВОК с участками разной емкости.

Подключение ВОК вертикального распределительного участка в здании производится через патч-панель к разъемам сплиттеров в ОРШ или подъездной ОРК независимо от места его расположения без промежуточных муфт и переходов на другой тип ВОК.

При проектировании и строительстве вертикального распределительного участка в здании возможно использовать как сварное, так и механическое соединение волокон ОБ.

Абонентский участок, или абонентская разводка, – это участок сети от этажной ОРК до помещения абонента, включая оптическую розетку. В абонентский участок также входит активное оборудование на стороне абонента (ONT, ONU), которое является неотъемлемым элементом технологии xPON и находится под управлением оператора.

Граница ответственности оператора (точка демаркации) проходит по внутренним выходным интерфейсам устройства, либо по системе управления устройства (в случае, если устройство поддерживает функции раздельного доступа к пользовательским и операторским настройкам). Абонент не должен иметь возможности применения произвольно выбранного ONT или ONU.

Оптическая абонентская розетка (ОРА) предназначена для установки в квартире абонента. Конструкция ОРА предусматривает возможность выкладки запаса ОБ.

Для подключения к сети xPON (ONT/ONU) телефонов может использоваться витая пара категории 3, для подключения компьютеров – витая пара категории 5, для подключения телевизоров – коаксиальный кабель.

Топология xPON. При построении пассивных оптических сетей могут использоваться следующие топологии.

Топология «звезда» (рисунок 4) применяется при плотном расположении абонентов в районе узла связи. Данная топология характеризуется минимальным количеством оптических разветвителей и единственным местом их установки. Достоинства данной топологии: удобство в обслуживании, проведении эксплуатационных измерений и обнаружении места повреждения линии.

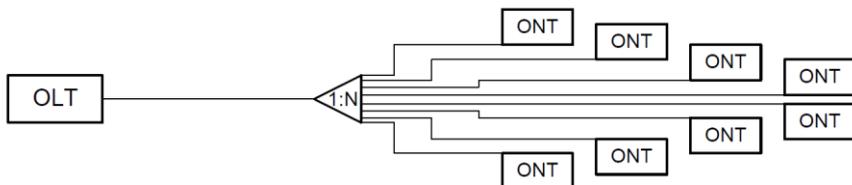


Рисунок 4 – Топология «звезда»

Топология «шина» представлена на рисунке 5. Она применяется при расположении абонентов вдоль оптической магистрали. Особенность топологии в большой разности выходных мощностей оптических разветвителей. «Шина» требует подробного расчета уровня оптического сигнала для подбора соответствующих неравномерных разветвителей (с неравномерным разделением мощности по отводам) таким образом, чтобы входная оптическая мощность на каждом оптическом приемнике соответствовала его чувствительности (диапазону входной мощности) оборудования. Топология рекомендована для применения при линейном расположении пользователей вдоль магистрали и только при небольшом количестве каскадов.

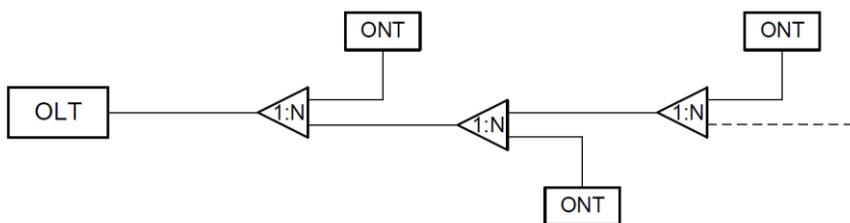


Рисунок 5 – Топология «шина»

Топология «дерево» (рисунок 6) применяется при разнесенном расположении абонентов. Оптимальное распределение мощности между различными ветвями решается подбором коэффициентов деления оптических разветвителей. Древообразная топология гибкая с точки зрения потенциального развития и расширения абонентской базы.

Каждая топология имеет свои достоинства и недостатки с точки зрения экономики ОВ, удобства тестирования, эксплуатации, обслуживания и возможности развития сети. Характеристики всех трех топологий приведены в таблице 1.

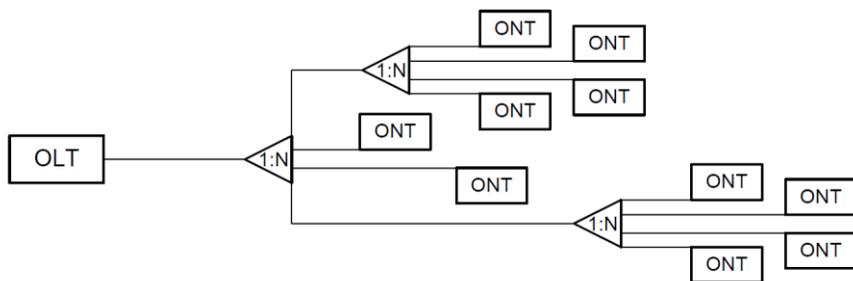


Рисунок 6 – Топология «дерево»

Таблица 1 – Характеристики топологий пассивных оптических сетей

Характеристики топологий	Виды топологий		
	«звезда»	«шина»	«дерево»
Экономия ОВ	Низкая	Высокая	Высокая
Тестирование и обслуживание	Диагностика из центра. Простая и точная локализация событий	Сложное диагностирование событий	Сложное диагностирование событий
География расположения абонентов	Большой разброс/ произвольное расположение	Вдоль транспортных магистралей	Кластеры/ произвольное расположение
Возможности развития	Максимальное использование свободных портов	Ограничены вдоль магистрали	Необходим правильный расчет разветвителей
Уровень принимаемого сигнала	Почти одинаковый	Разный при одностипных разветвителях	Необходим точный расчет для выравнивания
Прочие достоинства/недостатки	Массовое подключение в районах с плотным размещением абонентов	Избыточные потери при разветвителях при большом числе каскадов	Наибольшая гибкость при подключении всех желающих

Оптические разветвители (сплиттеры) обеспечивают деление оптического сигнала и подразделяются:

- по числу входных и выходных портов – $1 \times N$ (один вход и несколько выходов); $2 \times N$ (двухвходные разветвители); N лежит в диапазоне от 2 до 64;
- коэффициенту деления оптической мощности: равномерное (например, делитель на четыре имеет по 25 % мощности на каждом отводе); неравномерное (для неравномерных разветвителей шаг коэффициента деления (разницы в выходной мощности) обычно составляет 5 %);
- рабочей длине волны – однооконные ($\lambda = 1310$ или 1550 нм); двухоконные ($\lambda = 1310$ и 1550 нм); трехоконные ($\lambda = 1310, 1490, 1550$ нм); широкополосные ($\lambda = 1310 \dots 1620$ нм);
- классу качества: А и Б;
- технологии производства.

Разъемные соединения. На всем сегменте сети xPON необходимо использовать однотипные разъемные соединения – коннекторы, – что упрощает комплектацию объектов и подготовку обслуживающего персонала, сокращает ассортимент ЗИП.

Неразъемные соединения. ОВ могут соединяться между собой сварным или механическим способом. Для механического соединения ОВ используется специальное устройство – сплайс (splice). Сплайс состоит из корпуса, в который через специальные каналы и направляющие вводятся сколотые концы ОВ. Направляющие служат для прецизионной стыковки торцов в камере, заполненной иммерсионным гелем, необходимым для сведения к минимуму переходного затухания и герметичности соединения. Показатель преломления геля близок к показателю сердцевины ОВ, что позволяет свети к минимуму обратное отражение. Сверху корпус закрывается крышкой.

Вносимые потери в сплайсе $\leq 0,5$ дБ (среднее значение вносимых потерь в сплайсах различных производителей – 0,1 дБ).

Резервирование xPON. Резерв ОВ на магистральном участке определяется по схеме 1 + 1, т. е. на каждое ОВ в нагрузке требуется резервное ОВ. При большой емкости ОВ в нагрузке (от 8 ОВ), заводимых в ОРШ, допускается уменьшение резервных ОВ из расчета: на 2 ОВ в нагрузке – 1 резервное ОВ.

Количество ОВ в модуле многомодульного ВОК магистрального участка выбирается с учетом резервных ОВ.

На абонентском участке резервирование ОВ не предусматривается.

Порядок выполнения работы

1 Изучить краткие сведения из теории.

2 В соответствии с шифром выбрать из таблицы 2 здание узла связи, в котором будет расположен стационарный участок xPON и 10 домов, жильцов которых необходимо подключить к xPON.

3 Выбрать тип (при четной последней цифре шифра – GPON, при нечетной – EPON) и топологию пассивной оптической сети.

4 Определить количество абонентов для каждого дома с учетом планируемого процента абонентов, подключенных по технологии xPON от общего количества абонентов, используя характеристики микрорайона «Телекоммуникационный» из таблицы 3.

5 Для каждого дома определить количество оптических волокон, которое необходимо подвести к ОРШ. Расчет производить кратным числу оптических волокон в одном модуле с учетом использования одного основного и одного резервного волокна на 32 подключаемых абонента (при использовании сплиттера 1:32).

Кроме того, необходимо учесть абонентов, которые решат подключиться впоследствии, поэтому для общего количества оптических волокон, подводимых к ОРШ дома, необходимо учитывать все квартиры.

Таблица 2 – Исходные данные для расчета дисперсии оптического сигнала

Первая цифра шифра	Номер здания узла связи	Последняя цифра шифра	Номера домов для подключения к xPON
0	10	0	1–10
1	1	1	1–3, 6–12
2	2	2	4, 7, 14–19, 31, 32
3	3	3	10–13, 20–25
4	4	4	20–29
5	5	5	16–18, 20–22, 27, 28, 31, 33
6	6	6	26–30, 40–42, 44, 45
7	7	7	27–29, 31–33, 36–39
8	8	8	34–41, 46, 47
9	9	9	37, 40–45, 48–50

Таблица 3 – Характеристики домов микрорайона и их абонентов

Номер дома	Характеристики домов			
	Количество этажей	Количество подъездов	Количество квартир на лестничной площадке	Процент абонентов, желающих подключиться к xPON, %
1	9	3	4	65
2	9	3	4	75
3	9	8	4	70
4	5	2	4	55
5	5	2	4	65
6	5	2	4	70
7	5	2	4	75
8	5	2	4	65
9	5	2	4	75
10	5	2	3	80
11	5	3	4	80
12	9	2	4	75
13	9	2	4	70
14	9	2	4	65
15	11	1	5	50
16	5	2	3	80
17	5	2	3	85
18	11	1	5	60
19	9	2	4	35
20	5	2	3	95
21	9	4	3	85
22	5	2	3	90
23	17	1	6	65
24	9	2	3	85
25	9	2	3	80
26	9	2	3	85

Окончание таблицы 3

Номер дома	Характеристики домов			
	Количество этажей	Количество подъездов	Количество квартир на лестничной площадке	Процент абонентов, желающих подключиться к xPON, %
27	4	2	3	95
28	4	2	3	90
29	4	3	4	45
30	9	2	3	95
31	9	2	4	35
32	5	2	4	30
33	11	1	5	55
34	9	2	4	65
35	7	2	4	40
36	5	2	4	35
37	5	2	4	25
38	9	4	3	80
39	9	4	3	85
40	5	2	3	95
41	7	2	4	35
42	9	3	4	55
43	7	2	4	40
44	5	4	3	90
45	5	2	4	25
46	9	4	3	45
47	9	3	4	25
48	5	2	4	30
49	5	2	4	35
50	5	2	4	20

Например, для 9-этажного дома с пятью подъездами и четырьмя квартирами на лестничной площадке общее количество квартир составит 180. При проценте абонентов, подключенных к xPON, равном 70, их количество составит 126. Однако, с учетом подключения новых абонентов в будущем, расчет следует вести для потенциального (максимального в наихудшем случае) количества абонентов. Для такого количества абонентов потребуется 12 ОВ: $180 / 32 = 5,625 \approx 6$ (основных волокон) и еще 6 резервных волокон. В зависимости от принятого количества ОВ в одном модуле для магистрального ВОК может понадобиться один из следующих вариантов:

- 12 ОВ при 4 ОВ в одном модуле (3 модуля);
- 12 ОВ при 6 ОВ в одном модуле (2 модуля);
- 16 ОВ при 8 ОВ в одном модуле (2 модуля);
- 20 ОВ при 10 ОВ в одном модуле (2 модуля);
- 12 ОВ при 12 ОВ в одном модуле (1 модуль);
- 16 ОВ при 16 ОВ в одном модуле (1 модуль).

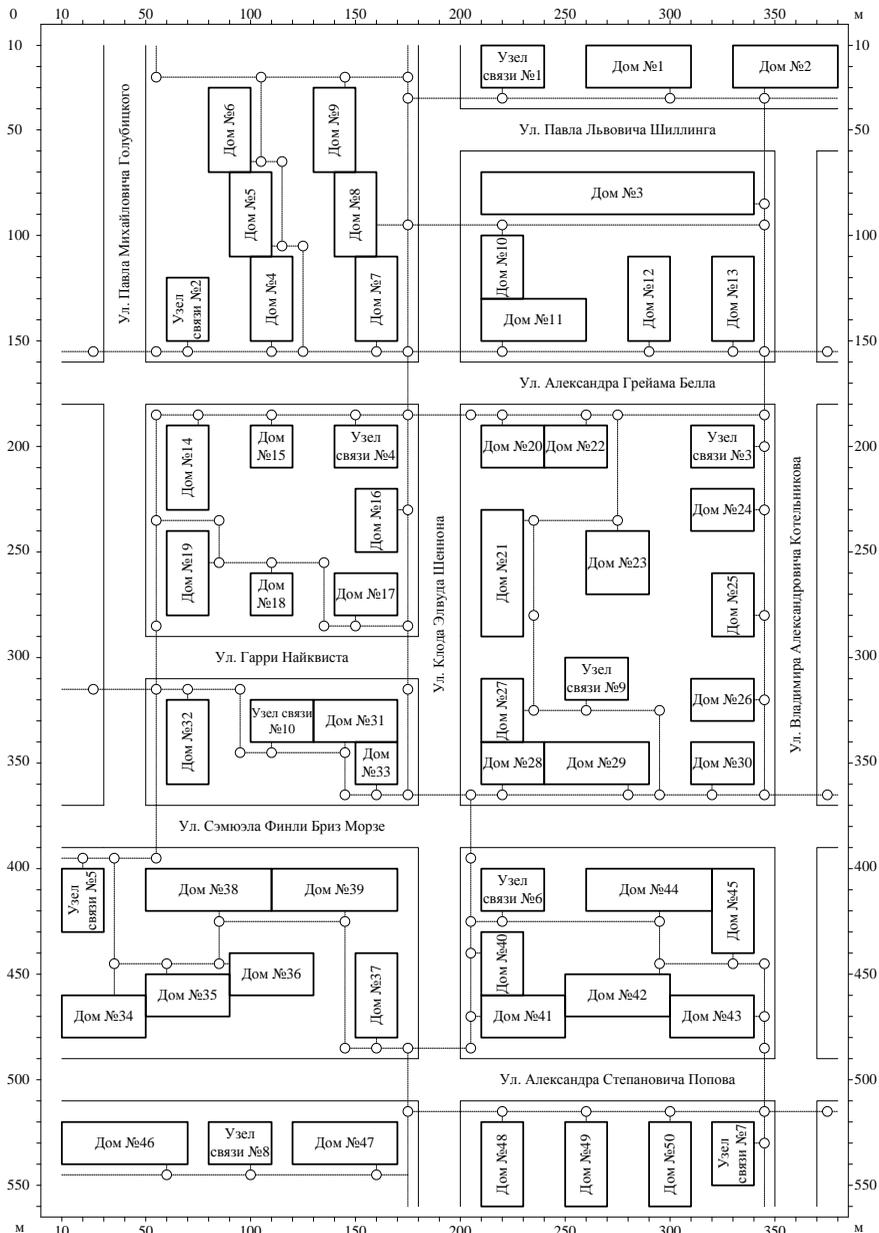


Рисунок 7 – Схема-план микрорайона «Телекоммуникационный»

Количество модулей в волоконно-оптическом кабеле выбирается одинаковым для всех домов, подключенных к данному кабелю.

6 Определить необходимое количество кабелей с учетом того, что количество волокон в одном кабеле должно быть равно 32, 48 или 64.

7 По схеме-плану микрорайона «Телекоммуникационный» (рисунок 7), используя существующую сеть кабельной канализации по кратчайшему расстоянию, проложить волоконно-оптический кабель от ODF в здании узла связи до ОРШ в жилых домах согласно заданию с указанием муфт ВОК.

8 По итогам выполнения предыдущих пунктов заполнить таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты расчета протяженности участков

номер	Дом			Абоненты			Количество ОВ	Количество модулей
	этажность	количество подъездов	количество квартир на этаже	процент, %	количество подключаемых	всего		

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Схема-план микрорайона «Телекоммуникационный» с указанием способа прокладки ВОК и количества волокон до указанных в задании жилых домов.
- 3 Расчет количества оптических волокон и муфт для каждого дома.
- 4 Вывод по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Назначение технологии xPON.
- 2 Типы и топологии сетей xPON.
- 3 Основные участки сети xPON.
- 4 Назначение сплиттеров и их схемы включения.
- 5 Неразъемные соединения.

Практическая работа № 7

РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКОГО БЮДЖЕТА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ xPON

Цель работы: определить качество обслуживания абонентов xPON, с использованием результатов расчета оптического бюджета волоконно-оптической линии xPON до самого удаленного абонента.

Краткие сведения из теории

Каждый компонент оптоволоконного тракта сети xPON имеет свою величину оптических потерь. Допустимые потери оптического сигнала на всем пути от оптического передатчика до приемника называют оптическим бюджетом мощности.

Оптический бюджет приемопередающего оборудования определяется как интервал $[OB_{\min}, OB_{\max}]$, дБ

$$OB_{\max} = P_{out, \min} - P_{in, \min}; \quad (1)$$

$$OB_{\min} = P_{out, \max} - P_{in, \max}; \quad (2)$$

где $P_{out, \min}, P_{out, \max}$ – допустимый разброс мощностей передатчиков, дБ;

$P_{in, \min}, P_{in, \max}$ – допустимый уровень принимаемого сигнала на приемниках, при котором коэффициент ошибок (BER) не превышает заданный уровень, дБ.

Волоконно-оптический канал электросвязи удовлетворяет заданному бюджету, если потери мощности сигнала в канале электросвязи (затухание в оптическом волокне, потери на коннекторах, разветвителях и других компонентах) с учетом допустимых искажений сигналов попадают в интервал $[OB_{\min}, OB_{\max}]$.

Расчеты затухания оптического сигнала выполняются для оптической линии от точки подключения оптического волокна на активном оборудовании (на передатчике) до самого удаленного абонента (на приемнике). В пассивной сети xPON источниками потерь являются:

- полное затухание в оптическом волокне – зависит от его длины и коэффициента затухания оптического волокна на определенной длине волны;
- полные потери в сростках сварных соединений – зависят от потерь в каждом сростке и их общего количества;
- полные потери в механических соединениях – зависят от потерь в каждом соединении и их общего количества;
- полные потери в «контактах» разъемных соединений – зависят от потерь в каждом соединителе и их общего количества;
- потери в разветвителях оптического волокна – зависят от коэффициента разветвления сплиттера (количества его портов);
- штрафные потери – это потери на изгибы ВОК при прокладке.

Сумма всех потерь, возникающих на участке сети xPON, представляет собой энергетический бюджет затухания. При расчетах следует учитывать и эксплуатационный запас в виде дополнительных сростков и вставок при проведении ремонтных работ, а также запас на естественное старение оптического волокна. В целом рекомендуется оставлять запас бюджета мощности в 1,5–2 дБ после полностью выполненного подключения всего тракта от станционного порта OLT в узле связи (точка присутствия провайдера) вплоть до абонентского ONT в квартире.

Диапазон ослабления сигнала $[OB_{\min}, OB_{\max}]$ в сети xPON зависит от класса. Для BPON и GPON существуют классы А, В и С:

- класс А: 5–20 дБ;
- класс В: 10–25 дБ;
- класс С: 15–30 дБ.

Для EPON задан параметр OB_{\max} и существуют классы 1 и 2:

- класс 1: прямой поток – 21 дБ, обратный поток – 23 дБ;
- класс 2: прямой поток – 26 дБ, обратный поток – 26 дБ.

Ширина диапазона допустимого ослабления сигнала в сети для оборудования любого класса составляет 15 дБ.

Ширина диапазона допустимого ослабления сигнала определяется адаптационными возможностями детекторов или шириной их рабочих диапазонов.

По окончании расчета остается лишь выбрать подходящий класс приемопередатчиков либо использовать аттенюатор для приведения полученных потерь по оптическим путям сети в требуемый интервал.

Для расчета оптического бюджета в сети xPON с равномерными оптическими разветвителями достаточно рассчитать ослабление сигнала в одном канале OLT–ONT_{*i*} (самом протяженном). Расчет бюджета потерь должен подтвердить, что для *i*-й цепи общая величина потерь (включая запас и штрафные потери) удовлетворяет условию (BPON, GPON):

$$OB_{\min} \leq A\Sigma_i \leq OB_{\max} - Z - A, \quad (3)$$

где $A\Sigma_i$ – суммарные потери в линии между OLT и ONT_{*i*} для *i*-го канала ($i = 1 \dots N$, где N – число абонентских окончаний), дБ;

Z – ослабление сигнала из-за деградации волокна/компонентов, влияющих внешних условий, искажения формы сигнала из-за хроматической и поляризационной модовой дисперсии, дБ;

A – эксплуатационный запас в виде дополнительных сростков и вставок при проведении ремонтных работ, дБ.

Для EPON в условии (3) отсутствует параметр OB_{\min} :

$$A\Sigma_i \leq OB_{\max} - Z - A. \quad (4)$$

Для каждого канала электросвязи OLT–ONT_{*i*} можно рассчитать суммарные потери в линии между OLT и ONT_{*i*} в прямом (*d*) и обратном (*u*) потоках:

$$A\Sigma_{di} = \alpha_d \times L_i + IL_i + AL + WL + RL_i + CL_i + SL_i, \quad (5)$$

$$A\Sigma_{ui} = \alpha_u \times L_i + IL_i + AL + WL + RL_i + CL_i + SL_i, \quad (6)$$

где L_i – длина *i*-го канала, км;

α_d – удельное затухание в оптическом волокне на длине волны прямого потока, дБ;

α_u – удельное затухание в оптическом волокне на длине волны обратного потока, дБ;

IL_i – вносимые потери всеми разветвителями в i -м канале, дБ;
 RL_i – потери на всех коннекторах (разъемных соединениях) в i -м канале, дБ;
 CL_i – потери на всех неразъемных сварных соединениях в i -м канале, дБ;
 SL_i – потери на всех неразъемных механических и сварных соединениях в i -м канале, дБ;
 AL – ослабление сигнала на аттенуаторе, дБ;
 WL – ослабление сигнала на WDM мультиплексоре, дБ.

Ослабление сигнала (Z) может зависеть от длины волны, однако при этом рекомендуется суммарно оценивать все такие потери величиной 1 дБ.

Рабочие диапазоны приемников/передатчиков меняются в зависимости от направления и скорости передачи. Однако согласованные требования к ним обеспечивают постоянство оптического бюджета [OB_{\min} , OB_{\max}]. Поэтому индекс для обозначения направления потока опускается.

Для сетей с использованием разветвителей с малым количеством портов (количеством абонентов на один порт OLT) может потребоваться принудительное ослабление сигнала аттенуатором. У приемного детектора, кроме минимальной чувствительности $p_{in,\min}$, существует и верхняя граница рабочего режима $p_{in,\max}$, которая называется порогом перегрузки. При более мощном сигнале детектор уже не может принимать сигнал с требуемым для рабочего режима уровнем ошибок $BER = 10^{-10}$, так как выходит в режим насыщения. Учитывая вариации уровня средней мощности, излучаемой лазером, $p_{out,\min} - p_{out,\max}$, максимально допустимое ослабление сигнала не превышает значение, рассчитанное по формуле (1), а минимально допустимое ослабление сигнала не меньше значения, рассчитанного по формуле (2).

Ослабление мощности сигнала в оптических компонентах отдельного канала OLT–ONT i показано на рисунке 1.

Расчет оптического бюджета следует производить с учетом данных о реальных параметрах активного оборудования, ВОК и компонентов сети, предоставленных производителями.

Графически процесс расчета оптического бюджета в сети xPON с равномерными оптическими разветвителями может быть представлен графически (рисунк 2).

Порядок выполнения работы

1 Изучить краткие сведения из теории.

2 Определить протяженность каждого участка ВОК (от ODF до ответвления модуля, от одного ответвления модуля до другого и от ответвления модуля до ОРШ). Расстояния от ODF до выхода кабеля из здания узла связи в канализацию, а также от входа кабеля из канализации в жилой дом до ОРШ принимается равным 10 метров. Результаты расчетов представить в виде таблицы 1.

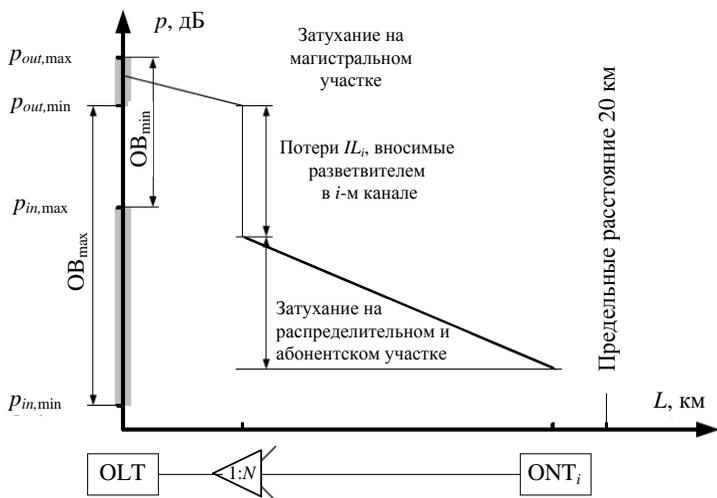


Рисунок 1 – Ослабление мощности сигнала в оптических компонентах отдельного канала xPON

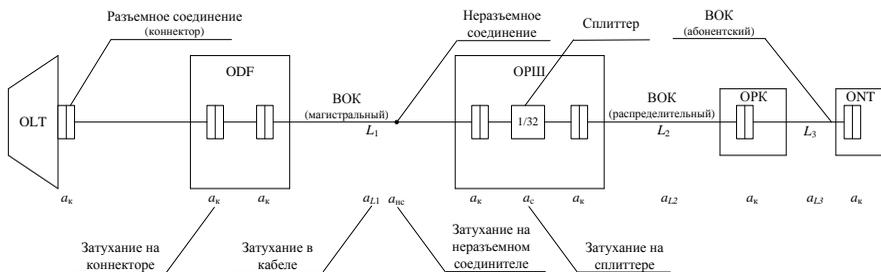


Рисунок 2 – Графический расчет оптического бюджета в сети xPON

3 Определить самого удаленного абонента каждого дома (жителя квартиры последнего этажа) от станционного оборудования сети xPON, для которых в предыдущей практической работе была организована пассивная оптическая сеть.

4 Для выбранного абонента рассчитать протяженность магистрального кабеля и распорядительного ВОК, принимая высоту одного этажа 3 м. Расстояние кабеля от ОРШ жилого дома до ОРК на этаже принять равным сумме высот всех этажей ниже того, на котором располагается ОРК с добавлением одного метра. Например, протяженность кабеля от ОРШ до ОРК на первом этаже составит 1 м; на четвертом этаже – 10 м; на восьмом этаже – 22 м. Протяженность абонентского кабеля принять равной 7 м. Для учета

расстояния от места ввода кабельной канализации в дом до дальнего от него подъезда необходимо учитывать длину дома или ее часть. Результаты расчетов представить в виде таблицы 1.

Таблица 1 – Результаты расчета протяженности участков

Наименование участков от ODF до ОРШ	Расстояние магистрального участка, м	Расстояние распределительного и абонентского участков, м	Суммарное расстояние, м

5 По формулам (5) и (6) рассчитать суммарные потери до выбранного абонента. Для используемых констант следует принять следующие значения.

Передача оптического сигнала в прямом потоке осуществляется на длине волны 1550 нм ($\alpha_d = 0,24$ дБ/км), в обратном потоке – 1310 нм ($\alpha_u = 0,36$ дБ/км).

Затухания, вносимые разветвителями (сплиттерами) приведены в таблице 2.

Аттенуатор в линии связи необходимо использовать в том случае, если суммарные потери слишком малы и не превышают OB_{\min} . В противном случае $AL = 0$ дБ.

WDM вносит затухание 0,3 дБ на один этап фильтрации. При двух этапах фильтрации примем $WL = 0,6$ дБ.

Таблица 2 – Затухание оптического сигнала в разветвителях (сплиттерах)

Коэффициент деления	Затухание, дБ	Коэффициент деления	Затухание, дБ
1×2	4,3	1×12	12,5
1×3	6,2	1×16	13,9
1×4	7,4	1×24	16,0
1×6	9,5	1×32	17,2
1×8	10,7	1×64 (GPON)	21,5

Суммарные потери на оптических коннекторах определяются как произведения числа коннекторов в линии на потери оптического сигнала в типовом коннекторе ($a_k = 0,2$ дБ). Количество коннекторов в линии равно 7.

Суммарные потери на неразъемных сварных соединениях определяются как произведения числа таких соединений в линии на потери оптического сигнала в типовом месте сварки ($a_{nc} = 0,05$ дБ). Количество неразъемных сварных соединений в линии примем равным 1 (в месте отвода модулей от магистрального кабеля к ОРШ жилого дома).

В линии первоначально будут отсутствовать неразъемные механические соединители, поэтому $SL = 0$ дБ.

6 По формулам (3) (для технологий BPON и GPON) и (4) (для технологии EPON) рассчитать оптический бюджет самого удаленного абонента для прямой и обратной передачи, а также определить класс xPON. Ослабление сигнала (Z) следует принять равным 1 дБ, эксплуатационный запас (A) – 2 дБ.

7 Графически изобразить расчет оптического бюджета самого удаленного подключаемого абонента сети xPON с указанием значений затуханий по примеру, представленному на рисунке 2.

Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Результаты расчета протяженности участков волоконно-оптического кабеля магистрального участка xPON (от ODF узла связи до ОПШ жилых домов).

3 Результаты расчета протяженности магистрального и распорядительного ВОК для самого удаленного абонента каждого дома сети xPON.

4 Результаты расчета суммарных потерь до выбранного абонента.

5 Результаты расчета оптического бюджета самого удаленного абонента всех домов для прямой и обратной передачи.

6 Графическое изображение расчета оптического бюджета самого удаленного абонента сети xPON одного из домов.

7 Вывод по работе.

Контрольные вопросы

1 Определение оптического бюджета.

2 Причины потерь в сети xPON.

3 Величины ослабления сигнала в сетях xPON.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы : сб. статей / под ред. С. А. Дмитриева, Н. Н. Слепова. – М. : Техносфера, 2010. – 607 с.

2 **Листвин, А. В.** Оптические волокна для линий связи / А. В. Листвин, В. Н. Листвин, Д. В. Швырков. – М. : Лесар-арт, 2003. – 288 с.

3 **Убайдуллаев, Р. Р.** Волоконно-оптические сети / Р. Р. Убайдуллаев. – М. : Эко-Трендз, 2000. – 267 с.

4 Пассивные оптические сети. Правила проектирования и монтажа : ТКП 300 – 2011 (02140). – Введ. 05.05.2011. – Минск: Министерство связи и информатизации Республики Беларусь.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

**ПАРАМЕТРЫ КОМПОНЕНТОВ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ**

Таблица А.1 – Параметры передатчиков на лазерах

Наименование	Длина волны, нм	Рабочий ток, мА	Пороговый ток, мА	Мощность, мВт
ЛД-1300-5	1310	35	10	5
ЛД-1300-10	1310	40	10	10
ЛД-1300-20	1310	60	10	20
ЛД-1300-30	1310	90	10	30
ЛД-1550-5	1550	50	15	5
ЛД-1550-10	1550	70	15	10
ЛД-1550-20	1550	100	15	20
ЛД-1550-30	1550	150	30	30

Таблица А.2 – Параметры передатчиков на диодах

Наименование	Длина волны, нм	Мощность, мВт	Рабочий ток, мА	Рабочее напря- жение, В
ТСД-1300	1270–1330	15	30–50	1,3–1,7
ТСД-1500	1510–1560	40	30–70	1–1,7
ПОМ-460М	1250–1350	20	35–70	4,5–5,5
ПОМ-470	1250–1350	4	35–70	4–5
ИЛПН-360	1250–1350	4	50–70	4,5–5,5
СЛД-1060	1057–1068	10	150–400	1,3–2
СЛД-1300	1270–1330	5	150–400	1,3–2

Таблица А.3 – Параметры приемников оптического излучения

Тип модуля	Длина волны, нм	Скорость приема, Мбит/с	Чувствительность, дБм или А/Вт	Напряжение питания, В
АТАV2400	1200–1600	800–2500	–34	4,5–5,5
РТАV155С	1200–1600	50–155	–39	4,5–5,5
РТАУ622С	1200–1600	200–622	–33	4,5–5,5
РТАV2400	1200–1600	800–2500	–24	4,5–5,5
DT200	1200–1600	10–200	–35...–32	4,75–5,46
DRP2 43	1000–1600	10–155	–50	–
DRP2S	1000–1600	622	–38	–
PP-10G	1200–1600	60–10000	–18	7,5–8,5
MD(C)RL	1200–1600	16–622	–40	4,7–5,3
MDRI	1200–1600	800–2500	–22	4,7–5,3
ПРОМ-364	1200–1570	4–320	–55	5

Окончание таблицы А.3

Тип модуля	Длина волны, нм	Скорость приема, Мбит/с	Чувствительность, дБм или А/Вт	Напряжение питания, В
ПРОМ-365	1200–1570	2500	–28	5
ПРОМ-367	1200–1570	2, 8, 34	–31	5
ПРОМ-376	1200–1570	622	–31	3,3
PROM-34	1100–1650	2, 8, 34	–39	5
PROM-155	1100–1650	155	–36	5
PROM-50	1300–1550	2, 8, 34	–43	5

Таблица А.4 – Характеристики стандартных одномодовых оптических волокон со ступенчатым профилем показателя преломления

Производитель		Alcatel		Corning		Optical Fiber Solutions	Samsung Electronics	Sumitomo Electric Industries Ltd.	Yangtze Optical Fibre and Cable	Hitachi cable	
Марка ОВ		6900	6901	SMF-28	SMF-28e	OFS MC-SM 332	SF-SMF-x	G.652	Pure-Band	YOFC 268WY	G.652
Затухание α , дБ/км	$\lambda = 1310$ нм	0,34	0,35	0,34	0,34	0,35	0,33	0,33	0,36	0,35	0,35
	$\lambda = 1550$ нм	0,24	0,22	0,20	0,20	0,22	0,19	0,19	0,22	0,21	0,21
Длина волны нулевой дисперсии λ_0 , нм		1300	1300	1302	1302	1300	1302	1312	1313	1302	1300
Параметр наклона спектральной характеристики дисперсии ОВ в точке нулевой дисперсии S_0 , пс/(нм ² ·км)		0,092	0,090	0,090	0,086	0,088	0,091	0,086	0,086	0,093	0,092
Параметр ПМД ОВ, PMD, пс/√км		0,1	0,08	0,1	0,08	0,1	0,1	0,1	0,02	0,2	0,2
Строительная длина кабеля, км		2	4	6	2	4	4	2	6	6	4

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(обязательное)
ТАБЛИЦА ЗНАЧЕНИЙ ОБРАТНОЙ ФУНКЦИИ ЛАПЛАСА

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

x	$Q(x)$	x	$Q(x)$	x	$Q(x)$	x	$Q(x)$
0,1	0,460172	0,5	0,308538	0,9	0,184006	4	$3,17 \cdot 10^{-5}$
0,11	0,456205	0,51	0,305026	0,91	0,181411	4,1	$2,07 \cdot 10^{-5}$
0,12	0,452242	0,52	0,301532	0,92	0,178786	4,2	$1,33 \cdot 10^{-5}$
0,13	0,448283	0,53	0,298056	0,93	0,176186	4,3	$8,54 \cdot 10^{-6}$
0,14	0,44433	0,54	0,294599	0,94	0,173609	4,4	$5,41 \cdot 10^{-6}$
0,15	0,440382	0,55	0,29116	0,95	0,171056	4,5	$3,4 \cdot 10^{-6}$
0,16	0,436441	0,56	0,28774	0,96	0,168528	4,6	$2,11 \cdot 10^{-6}$
0,17	0,432505	0,57	0,284339	0,97	0,166023	4,7	$1,3 \cdot 10^{-6}$
0,18	0,428576	0,58	0,280957	0,98	0,163543	4,8	$7,93 \cdot 10^{-7}$
0,19	0,424655	0,59	0,277595	0,99	0,161087	4,9	$4,79 \cdot 10^{-7}$
0,2	0,42074	0,6	0,274253	1	0,158655	5	$2,87 \cdot 10^{-7}$
0,21	0,416834	0,61	0,270931	1,1	0,135666	5,1	$1,7 \cdot 10^{-7}$
0,22	0,412936	0,62	0,267629	1,2	0,11507	5,2	$9,96 \cdot 10^{-8}$
0,23	0,409046	0,63	0,264347	1,3	0,0968	5,3	$5,79 \cdot 10^{-8}$
0,24	0,405165	0,64	0,261086	1,4	0,080757	5,4	$3,33 \cdot 10^{-8}$
0,25	0,401294	0,65	0,257846	1,5	0,066807	5,5	$1,9 \cdot 10^{-8}$
0,26	0,397432	0,66	0,254627	1,6	0,054799	5,6	$1,07 \cdot 10^{-8}$
0,27	0,39358	0,67	0,251429	1,7	0,044565	5,7	$5,99 \cdot 10^{-9}$
0,28	0,389739	0,68	0,248252	1,8	0,03593	5,8	$3,32 \cdot 10^{-9}$
0,29	0,385908	0,69	0,245097	1,9	0,028717	5,9	$1,82 \cdot 10^{-9}$
0,3	0,382089	0,7	0,241964	2	0,02275	6	$9,87 \cdot 10^{-10}$
0,31	0,37828	0,71	0,238852	2,1	0,017864	6,1	$5,3 \cdot 10^{-10}$
0,32	0,374484	0,72	0,235762	2,2	0,013903	6,2	$2,82 \cdot 10^{-10}$
0,33	0,3707	0,73	0,232695	2,3	0,010724	6,3	$1,49 \cdot 10^{-10}$
0,34	0,366928	0,74	0,22965	2,4	0,008198	6,4	$7,77 \cdot 10^{-11}$
0,35	0,363169	0,75	0,226627	2,5	0,00621	6,5	$4,02 \cdot 10^{-11}$
0,36	0,359424	0,76	0,223627	2,6	0,004661	6,6	$2,06 \cdot 10^{-11}$
0,37	0,355691	0,77	0,220665	2,7	0,003467	6,7	$1,04 \cdot 10^{-11}$
0,38	0,351973	0,78	0,217695	2,8	0,002555	6,8	$5,23 \cdot 10^{-12}$
0,39	0,348268	0,79	0,214764	2,9	0,001866	6,9	$2,6 \cdot 10^{-12}$
0,4	0,344578	0,8	0,211855	3	0,00135	7	$1,28 \cdot 10^{-12}$
0,41	0,340903	0,81	0,20897	3,1	0,000968	7,1	$6,24 \cdot 10^{-13}$
0,42	0,337243	0,82	0,206108	3,2	0,000687	7,2	$3,01 \cdot 10^{-13}$
0,43	0,333598	0,83	0,203269	3,3	0,000483	7,3	$1,44 \cdot 10^{-13}$
0,44	0,329969	0,84	0,200454	3,4	0,000337	7,4	$6,81 \cdot 10^{-14}$
0,45	0,326355	0,85	0,197663	3,5	0,000233	7,5	$3,19 \cdot 10^{-14}$
0,46	0,322758	0,86	0,194895	3,6	0,000159	7,6	$1,48 \cdot 10^{-14}$
0,47	0,319178	0,87	0,19215	3,7	0,000108	7,7	$6,77 \cdot 10^{-15}$
0,48	0,315614	0,88	0,18943	3,8	$7,23 \cdot 10^{-5}$	7,8	$3,11 \cdot 10^{-15}$
0,49	0,312067	0,89	0,186733	3,9	$4,81 \cdot 10^{-5}$	7,9	0

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Лабораторная работа № 1.</i> Изучение линейного кодирования в волоконно-оптических системах передачи	3
<i>Лабораторная работа № 2.</i> Изучение источников оптического излучения	12
<i>Лабораторная работа № 3.</i> Изучение приемников оптического излучения	30
<i>Лабораторная работа № 4.</i> Исследование локальных волоконно-оптических сетей передачи данных	44
<i>Лабораторная работа № 5.</i> Исследование сетей на основе технологии SDH.....	59
<i>Практическая работа № 1.</i> Анализ пропускной способности оптических волокон	72
<i>Практическая работа № 2.</i> Расчет вероятности битовой ошибки в волоконно-оптических системах передачи	78
<i>Практическая работа № 3.</i> Расчет потерь оптического сигнала в разъемных соединителях оптических волокон	82
<i>Практическая работа № 4.</i> Расчет каскада оптических усилителей EDFA	87
<i>Практическая работа № 5.</i> Расчет дисперсии оптического сигнала	94
<i>Практическая работа № 6.</i> Расчет волоконно-оптической сети связи xPON.....	102
<i>Практическая работа № 7.</i> Расчет оптического бюджета волоконно-оптической линии xPON	115
Список рекомендуемой литературы	122
Приложение А. Параметры компонентов волоконно-оптической системы передачи.....	123
Приложение Б. Таблица значений обратной функции Лапласа.....	125

Учебное издание

Буй Павел Михайлович
Белоусова Елена Сергеевна
Татур Светлана Сергеевна

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ**

Практикум

Редактор *Л. С. Ретикова*
Технический редактор *В. Н. Кучерова*

Подписано в печать 27. 12. 2018 г. Формат бумаги 60x84¹/₁₆
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 7,44. Уч.-изд. л. 7,98. Тираж 150 экз.
Зак № . Изд. №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский государственный университет транспорта.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/361 от 13.06.2014.
№ 2/104 от 01.04.2014.
№ 3/1583 от 14.11.2017.
Ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель