

**МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ  
КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение высшего образования

**Московский технический университет связи и информатики**

---

Кафедра многоканальных телекоммуникационных систем

**Учебно-методическое пособие**

по дисциплине

**ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ**

Для студентов 4 курса ЦЗОПБ

**Направление подготовки: 11.03.02**

Москва 2022

Учебно-методическое пособие  
по дисциплине  
ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

Составители:

С.В. Чёткин, к.т.н., доцент

Н.В. Дьяконов, профессор

Т.Н. Зуйкова, ст. преподаватель

Издание утверждено на заседании кафедры. Протокол № 9 от 16.05.2022 г.

Рецензент С.С. Шаврин, д.т.н., профессор

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>	<b>5</b>
<b>ИЗУЧАЕМЫЕ ТЕМЫ.....</b>	<b>5</b>
<b>СОДЕРЖАНИЕ ОБЗОРНЫХ ЛЕКЦИЙ, ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА И ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ. ПОРЯДОК СДАЧИ ЭКЗАМЕНА.....</b>	<b>17</b>
<b>ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....</b>	<b>19</b>
<b>МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАНИЙ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....</b>	<b>21</b>
<b>ЗАДАНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....</b>	<b>23</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>28</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Типовые задачи.....</b>	<b>29</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б Ответы на задачи.....</b>	<b>35</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В Пример титульного листа отчета по лабораторной работе.....</b>	<b>36</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г Пример титульного листа пояснительной записки курсовой работы.....</b>	<b>37</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Цифровые системы передачи» (ЦСП) изучается студентами бакалавриата в рамках основной профессиональной образовательной программы «11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи» по профилю «Инфокоммуникационные системы и сети» в соответствии с образовательным стандартом ФГОС3++. Программой дисциплины предусмотрено изучение цифровых систем передачи плездохронной и синхронной иерархий.

Бюджет времени по дисциплине ЦСП студентов заочной формы обучения 2020 года начала подготовки приведен в таблице 1 в академических часах (1 ак. час = 45 мин). Данные для другого года поступления могут отличаться от приведенных в таблице 1, поэтому их следует уточнять по соответствующему учебному плану.

Таблица 1 — Бюджет времени по дисциплине «Цифровые системы передачи»

Учебные занятия	7 семестр
<b>Аудиторные занятия</b>	<b>18</b>
Лекции	6
Практические занятия	6
Лабораторные занятия	6
<b>Самостоятельная работа</b>	<b>162</b>
Самостоятельное изучение разделов, подготовка к лабораторным и практическим занятиям	126
Выполнение курсовой работы	36
<b>Подготовка к экзамену</b>	<b>36</b>
Итого, ак. часов (36 ак. часов =1 з.е.):	216 (6 з.е.)
Вид промежуточного контроля	защита курсовой работы, экзамен

Основной формой изучения материала является самостоятельная работа с использованием рекомендуемой литературы и электронных ресурсов (см. с. 28). Целесообразно прорабатывать материал, пользуясь приведенными ниже методическими указаниями. Изучая материал, надо стремиться разобраться в нем, а не просто запомнить. Отмечайте всё, что непонятно – ответы на ваши вопросы будут даны на лекциях, консультациях, практических и лабораторных занятиях.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Методические указания содержат названия изучаемых тем, ссылки на рекомендуемую литературу (см. с. 28) и перечень основных вопросов к каждой теме, на которые следует обратить внимание при подготовке к экзамену.

### ИЗУЧАЕМЫЕ ТЕМЫ

1. Дискретизации аналогового сигнала. Структурная схема и принцип действия цепочки выборки и хранения [1, с. 17-23; 3, ч. 1, введение и п. 3].  
Обоснуйте необходимость дискретизации аналоговых сигналов. Чем отличаются сигналы АИМ-1 и АИМ-2? Изобразите структуру частотного спектра АИМ-сигнала и укажите правило выбора частоты дискретизации (сформулируйте теорему Котельникова). В каком случае в спектре АИМ-сигнала присутствуют гармоники частоты дискретизации? Объясните назначение цепочки выборки и хранения и принцип её действия.
2. Квантование. Шум квантования при равномерном квантовании. Характеристика неравномерной шкалы квантования типа А [1, с. 23-32; 3, ч. 1, введение и пп. 5, 6].  
Изобразите неквантованный и квантованный сигналы. Что такое уровень квантования, шаг квантования и ошибка квантования? В каких пределах может изменяться ошибка равномерного квантования? Чем отличается равномерное квантование от неравномерного? Постройте график защищенности от шумов равномерного квантования в зависимости от уровня сигнала. Укажите основной недостаток равномерного квантования. Что такое искажения перегрузки и когда они возникают?  
По какому закону должна изменяться защищенность сигнала от шумов квантования при изменении уровня сигнала? Для чего применяют неравномерное квантование? Объясните принцип формирования стандартной неравномерной шкалы квантования типа А. Изобразите структуру кодового слова. Приведите пример расчета операций кодирования и декодирования в соответствии с А-законом.
3. Структурная схема и принцип действия линейного кодека взвешивания [1, с. 36-38; 3, ч. 1, пп. 11, 12].  
Изобразите упрощенные структурные схемы линейных кодера и декодера, укажите названия и функции элементов схемы. Какую роль играет корректирующая поправка декодера?

Пользуясь таблицей 3 в [3, ч. 1, п. 11], поясните процедуру кодирования на конкретном примере: закодируйте линейным кодером напряжение 367 мВ при шаге квантования 0,4 мВ. Поясните работу декодера на конкретном примере: используя линейный декодер с шагом квантования 0,4 мВ, декодируйте кодовое слово *1001 1001 0111*.

4. Структурная схема и принцип действия нелинейного кодека взвешивания [1, с. 38-41; 3, ч. 1, п. 13].

Изобразите упрощенные структурные схемы нелинейных кодера и декодера. Укажите назначение элементов схемы. Какова разрядность стандартного кодера? На какие этапы можно разбить его работу? Поясните алгоритм формирования в коде номера сегмента. Укажите смысл корректирующей поправки. Как выбрать её величину?

Рассмотрите работу кодера на конкретном примере: закодируйте стандартным нелинейным кодером напряжение 367 мВ при напряжении ограничения 1,5 В. Поясните работу нелинейного декодера на конкретном примере, используя нелинейный декодер с минимальным шагом квантования 0,4 мВ, декодируйте кодовое слово *1001 0111*.

5. Структурная схема и принцип действия первичного мультиплексора [1, с. 66-68; 3, ч. 1, п. 17].

Укажите назначение первичного мультиплексора, изобразите его структурную схему. За что его называют гибким? Где выполняются операции кодирования/декодирования сигналов и мультиплексирования? Какие линейные и пользовательские интерфейсы поддерживает первичный гибкий мультиплексор? Для чего нужен блок управления и контроля?

6. Структура первичного цифрового потока E1 [1, с. 56-61; 3, ч. 1, п. 16].

Изобразите структуру сверхцикла потока E1, назовите элементы структуры и рассчитайте длительность каждого из них. Рассчитайте битовую скорость первичного потока E1. Сколько бит содержится в одном цикле, в одном субсверхцикле, в одном сверхцикле потока E1? Для чего нужны сверхциклы? Можно ли обойтись без них?

7. Виды синхронизации в ЦСП. Проскальзывания и их нормирование. Источники тактового синхросигнала [1, с. 82-92, 221-222; 3, ч. 1, пп. 19, 20].

Назовите два основных вида синхронизации в ЦСП. Объясните назначение каждого вида синхронизации и укажите последствия, к которым приводит их нарушение. Что такое проскальзывания, где и по каким причинам они появ-

ляются и к каким последствиям приводят? Чем отличаются неуправляемые проскальзывания от управляемых? Сформулируйте общий подход к управлению проскальзываниями, а также – к их нормированию.

Нарисуйте временную диаграмму тактового синхросигнала. Назовите его источники. Чем отличается активный ВТИ от пассивного? Что является наиболее важной частью пассивного ВТИ? Изобразите схему петли ФАПЧ и поясните назначение входящих в неё элементов.

8. Требования к системе цикловой синхронизации. Принцип скользящего поиска синхросигнала. Структурная схема и принцип действия приёмника циклового синхросигнала со скользящим поиском [1, с. 90-94; 3, ч. 1, пп. 22, 23].

Объясните, для чего нужна цикловая синхронизация. Что такое цикловой синхросигнал, как он выглядит и с каким периодом его передают. Назовите два главных параметра системы цикловой синхронизации. Сформулируйте принцип скользящего поиска синхросигнала, приведя соответствующую графическую иллюстрацию.

Изобразите структурную схему приёмника. Перечислите его элементы и укажите их функции. Объясните, как работает приёмник в каждом из следующих режимов: удержания, кратковременного сбоя, выхода из синхронизма, поиска синхросигнала, фиксации синхронизма. Для чего нужны накопители по входу и выходу из синхронизма? Как происходит поиск циклового и сверхциклового синхросигналов в цифровом потоке E1?

9. Преимущества цифровых инфокоммуникаций. Иерархии ЦСП. Обобщённая структурная схема плезиохронной ЦСП. Принципы мультиплексирования цифровых потоков [1, с. 5-10, 42-53; 3, ч. 1, введение и пп. 1, 2, 26].

Перечислите главные преимущества цифровых методов передачи, обработки и хранения сообщений. Объясните, что такое иерархия ЦСП и какие иерархии находят применение в настоящее время в разных странах. Назовите иерархические скорости европейской PDH (округлённо). Что означает аббревиатура STM-N и как рассчитать иерархические скорости на разных уровнях SDH? Укажите недостатки плезиохронных ЦСП. Перечислите достоинства технологии SDH. Отметьте недостатки SDH.

Изобразите обобщённую структурную схему плезиохронной ЦСП. Назовите её элементы и поясните назначение каждого из них. Что такое каналообразующее оборудование, регенератор, участок регенерации, ОРП, НРП?

Объясните, для чего нужно объединять цифровые потоки. Чем отличается синхронное мультиплексирование от асинхронного? Чем отличается побитное мультиплексирование от побайтного? Изобразите упрощённую структурную

схему формирования потока E2, укажите главные функции блока цифрового сопряжения БЦС (в учебнике [1] блок БЦС называется блоком асинхронного согласования скоростей БАС). Когда возникает необходимость в положительном согласовании скоростей (положительном выравнивании)? Когда возникает необходимость в отрицательном согласовании скоростей (двустороннем выравнивании)? Что такое стаффинг? Сколько команд согласования скоростей используется при одностороннем выравнивании и при двустороннем выравнивании?

10. Структуры вторичного цифрового потока E2 с двусторонним согласованием скоростей и с односторонним согласованием скоростей [1, с. 70-73, 378; 3, ч. 1, п. 29, таблицы 7 и 9].

Изобразите структуры цикла цифрового потока E2 с двусторонним согласованием скоростей и с односторонним согласованием скоростей в виде таблиц. Для каждой структуры цикла определите общее количество бит в цикле и количество служебных бит, процент служебных бит в цикле, а также длительность цикла, исходя из битовой скорости вторичного потока E2. Рассчитайте битовую скорость цифрового потока E2, исходя из структуры и параметров цикла.

Объясните, как передают команды согласования скоростей (КСС) и как исправляют ошибки в командах. Может ли в блоке цифрового сопряжения БЦС [3] (блоке асинхронного согласования скоростей БАС [1]) с положительным выравниванием возникнуть необходимость отрицательного выравнивания? Объясните сущность двухкомандного управления в цикле с двусторонним согласованием скоростей. Может ли в блоке цифрового сопряжения БЦС [3] (блоке асинхронного согласования скоростей БАС [1]) с положительным выравниванием возникнуть необходимость отрицательного выравнивания?

11. Структурная схема линейного тракта ЦСП по симметричному кабелю. Искажения первого и второго рода в линейном тракте на металлическом кабеле. Методы борьбы с межсимвольными помехами [1, с. 104-105, 113-121; 3, ч. 1, пп. 30, 31, 32].

Назовите главные элементы линейного тракта, построенного на основе симметричного кабеля. В чем суть процедуры регенерации? Как осуществляется электропитание регенераторов? Поясните разницу между однокабельной и двухкабельной схемами. Перечислите основные функции линейного трансформатора.

Объясните, как и почему коэффициент затухания симметричной пары зависит от частоты. Нарисуйте, как искажается форма прямоугольного импульса при

ограничении его спектра сверху. Почему помеху, обусловленную расширением элементов цифрового сигнала (импульсов), назвали межсимвольной? Укажите ее возможные негативные последствия. Изобразите, как сказывается на форме прямоугольного импульса ограничение его спектра снизу. Что такое «базовая линия», каков механизм ее «дрейфа» и каковы его последствия?

Назовите основной метод борьбы с межсимвольной помехой первого рода и устройство, реализующее его на практике. Изобразите (приблизительно) форму его АЧХ. Какова ширина рабочей полосы частот? Перечислите способы борьбы с межсимвольной помехой второго рода. Какой элемент линейного тракта симметричного кабеля является главным источником этой помехи? В чем состоит идея квантованной обратной связи?

12. Основные требования к линейным кодам. Основные виды линейных и стыковых кодов [1, с. 111-112, 118-119, 132-138, рис. 5.23, 5.25; 3, ч. 1, пп. 40, 41].

Объясните, для чего внутренний код аппаратуры преобразуют в линейный. Перечислите основные требования к линейным кодам. Дайте определения следующих показателей: -эффективность, помехоустойчивость, текущая цифровая сумма. Что такое барьер Найквиста? Как зависит помехоустойчивость от количества уровней кода? Какие коды называют балансными?

Объясните, в чем отличие линейного кода от стыкового. Могут ли они совпадать? Постройте временные диаграммы следующих видов кодов: ВН, БВН, БВНМ, ЧПИ, КВП-3, АБК, ОБК, ИТП, 3В2Т, 2В1Q для последовательности двоичных символов *1000 0111 1000 0111 0000 1101*.

13. Структурная схема и принцип действия регенератора квазитроичного сигнала. Глаз-диаграмма и ее основные параметры [3, ч. 1, с. 104-112, пп. 34, 42].

Укажите назначение регенератора, изобразите его структурную схему и объясните, как он работает. Сформулируйте правило решения. Каким образом устанавливают порог решения? Как выбирают моменты принятия решения? Какой параметр характеризует качество регенерации?

Поясните назначение глаз-диаграммы и причину такого названия. Изложите метод её построения. Нарисуйте примерный вид глаз-диаграммы двоичного сигнала и укажите на этом рисунке числовые характеристики области принятия решения. Как они зависят от длительности одиночного отклика тракта «кабель+корректор»? Изобразите схему установки, позволяющей визуально изучать глаз-диаграмму.

14. Общее понятие о схеме преобразований SDH. Формирование контейнеров. Виртуальные контейнеры и их сцепки. Трибутарный и административный блоки и их группы. Синхронный транспортный модуль STM-N, субсинхронные модули [1, с. 153-165; 3, ч. 2, пп. 43, 44, 45, 47].

Объясните, для чего нужна схема преобразований SDH. Расшифруйте все обозначения, принятые в ней. В чем суть операции мультиплексирования? Чем отличается размещение от выравнивания?

Укажите назначение контейнеров, их типы и размещаемые в них плезиохронные потоки, а также – длительности кадров контейнеров. Из каких компонентов состоит любой контейнер? Какие режимы предусмотрены для ввода потока E1? Как вводят поток E2? Пользуясь схемой преобразований SDH, подсчитайте, сколько потоков E1 можно передать в STM-1.

Укажите назначение виртуальных контейнеров. Перечислите их типы. Сколько виртуальных контейнеров передаётся в течение одной секунды? Изобразите кадры VC-3 и VC-4, поясните их структуру. Нарисуйте, как выглядит мультикадр VC-12, укажите его длительность. Поясните, в чем различие между VCHO и VCLO. Что такое сцепка, для чего она нужна? Какие бывают сцепки? Назовите виды виртуальных сцепок.

Укажите назначение трибутарных и административных блоков. Перечислите их разновидности. Какой вид цифрового выравнивания используют при формировании этих блоков? Как добиться того, чтобы события выравнивания происходили как можно реже? Поясните назначение указателя, приведите его структуру. Какое выравнивание предусмотрено при формировании TUG и AUG?

Изобразите структуру кадра STM-1. Подсчитайте количество бит, содержащихся в нем. Объясните назначение и основные функции секционных заголовков. Рассчитайте битовую скорость STM-1. Как формируются синхронные транспортные модули высших уровней иерархии? Сколько байт в кадре STM-N? Укажите назначение субсинхронных модулей и общий принцип их формирования.

15. Типы синхронных мультиплексоров. Топологии и архитектура синхронных сетей [1, с. 184-193, 198-204; 3, ч. 2, пп. 48, 50].

Перечислите главные функции синхронного мультиплексора. Назовите типы мультиплексоров и соответствующий их структурный состав. Проиллюстрируйте ответ соответствующими рисунками.

Изобразите основные топологические структуры сетей SDH и дайте им краткую характеристику. Что такое трёхуровневая иерархическая архитектура, в чем её достоинства?

16. Принципы резервирования в сетях SDH. Защита трафика в синхронных сетях [1, с. 204-213; 3, ч. 2, пп. 51, 52].

Назовите и кратко охарактеризуйте основные схемы резервирования. Перечислите объекты резервирования и укажите обычно применяемые для них схемы. Чем отличается реверсивное резервирование от нереверсивного? Для чего вводят защитный интервал?

Разъясните, что конкретно имеют в виду, когда говорят о резервировании трафика. Чем отличается линейный резерв от кольцевого? Однонаправленное защитное переключение от двунаправленного? Объясните, как работают следующие схемы защиты: MSPLine 1+1, MSPLine 1:1, однонаправленное и двунаправленное сдвоенные (двухволоконные) кольца. Как резервируют решетчатые структуры, построенные на основе АОП?

17. Необходимость тактовой сетевой синхронизации. Скремблирование сигнала STM [1, с. 152-153, 220-222; 3, ч. 2, пп. 47, 53].

Какие два тактовых генератора считаются работающими синхронно? Разъясните, почему желательна (но необязательна) синхронизация сетевых элементов на сети SDH от одного высококлассного задающего генератора. Какой эффект может дать синхронизация тактовых частот потоков E1 на сети PDH от того же самого генератора?

Что такое скремблирование? Что такое дескремблирование? Обоснуйте необходимость данного преобразования. Назовите основные свойства ПСП. Объясните работу генераторов ПСП на регистрах сдвига. Почему не скремблируют цикловой синхросигнал? Как понимать словосочетание «скремблер с предварительной установкой»?

18. Режимы работы сети синхронизации и источники синхросигнала. Построение подсистем внутриузловой и межузловой синхронизации. Эталонная цепь синхронизации. Передача сигналов SSM. Структурная схема и принцип действия генератора сетевого элемента [1, с. 222-228; 3, ч. 2, пп. 53, 54].

Перечислите режимы работы сети синхронизации, а также источники синхросигнала. Приведите классификацию источников по уровням качества.

Сформулируйте основные правила построения подсистемы внутриузловой синхронизации и подсистемы межузловой синхронизации.

Изобразите эталонную цепь синхронизации, назовите её основные параметры. Какую информацию несут сигналы SSM? Для чего она нужна? Как передают эти сигналы?

Нарисуйте укрупненную структурную схему ГСЭ. Объясните назначение каждого из его входов и выходов. В каких режимах он может работать? Сформулируйте логику выбора источника синхросигнала исходя из уровня качества и приоритета.

19. Показатели битовых ошибок. Нормирование и контроль битовых ошибок [1, с. 345-349, 177-181; 3, ч. 2, пп. 56, 58].

Объясните, что такое цифровые (битовые) ошибки и почему они могут возникать. Дайте определение BER и укажите основной недостаток этого показателя. Что такое время неготовности? Сформулируйте критерий полного отказа. Приведите определения  $ES_k$  и  $SES_k$ . Что такое блок? Блок с фоновой ошибкой? Определите следующие показатели:  $ES_T$  и  $SES_T$ , секунды с BBE.

Какие параметры битовых ошибок нормируются? Какие виды норм вам известны? Сформулируйте общий принцип расчета нормативных показателей.

Сформулируйте общий принцип контроля ошибок без перерыва связи, используемый и в телекоммуникационных, и в компьютерных сетях. Какой метод применяют в SDH при формировании проверочных кодовых слов? Объясните суть этого метода на конкретном примере. Какие пороговые значения коэффициента ошибок устанавливают в оборудовании SDH?

20. Фазовые флуктуации цифровых сигналов [1, с. 235-240; 3, ч. 2, п. 59].

Объясните, что такое фазовые флуктуации. Как называют «быстрые» и «медленные» флуктуации? В каких единицах их измеряют? Перечислите причины появления фазовых флуктуаций. Как они сказываются на работе оборудования? Чем отличаются систематические флуктуации от несистематических? Какие из них и почему более опасны? Укажите способы борьбы с фазовыми флуктуациями.

21. Передача пакетного трафика по сетям PDH и SDH [3, ч. 2, с. 294-296, п. 60].

Объясните, в чем принципиальное отличие трафика компьютерной сети от трафика телекоммуникационной сети. Для чего компьютерщикам нужны сети связи? Перечислите проблемы, возникающие на стыках компьютерных сетей с телекоммуникационными. Назовите три процедуры, входящие в состав универсальной технологии сопряжения пакетных сетей и сетей связи. Кратко охарактеризуйте каждую из них. В чем состоят главные преимущества этой технологии?

22. Многомодовые и одномодовые оптические волокна. Затухание в оптических волокнах [2, с. 14, 28-36, 42-45; 3, ч. 2, пп. 62, 63].

Перечислите главные достоинства оптических кабелей связи. Изобразите поперечное сечение оптического волокна, укажите его геометрические размеры. Что такое ППП? Какие они бывают? Какие волокна называют ступенчатыми, а какие - градиентными? Приведите классификацию типов волн (мод) в диэлектрическом волноводе. Какие волокна называют многомодовыми, а какие - одномодовыми? Дайте определение волны отсечки. Укажите волну отсечки высших мод для стандартного ОВ (SF). Чему равна волна отсечки фундаментальной моды  $HE_{11}$ ? Назовите все стандартные диапазоны, предназначенные для передачи сигналов по многомодовым и одномодовым волокнам.

Перечислите все источники потерь энергии в ОВ. Назовите главные из них. Какой параметр ОВ характеризует величину удельных потерь? Изобразите зависимости составляющих потерь от длины волны. Укажите координаты экстремальных точек. Сопоставьте потери в одномодовом и многомодовом волокнах.

23. Материальная, волноводная, хроматическая, межмодовая и поляризационная дисперсия в оптическом волокне [2, с. 14, 28-45; 3, ч. 2, пп. 62, 63, 64].

Объясните, что такое дисперсия и к каким негативным последствиям она приводит. Что такое показатель преломления? Что такое групповая задержка? Нарисуйте графики зависимостей показателя преломления и групповой задержки от длины волны для беспримесного кварцевого стекла. Назовите причину материальной дисперсии. Назовите причину волноводной дисперсии. От чего зависит её величина? Как можно управлять величиной волноводной дисперсии?

Назовите две составляющие хроматической дисперсии. Нарисуйте зависимость групповой задержки, обусловленной хроматической дисперсией, от длины волны. Дайте определение коэффициента хроматической дисперсии. В каких единицах он измеряется? Что такое уширение и как его рассчитать? Изобразите зависимости коэффициента дисперсии от длины волны для ОВ следующих типов: SF, DSF, NZDSF. Что такое накопленная дисперсия? Запишите условие полной компенсации хроматической дисперсии.

Назовите причину межмодовой дисперсии. Дайте определение дисперсионного параметра, укажите единицу его измерения. Как рассчитать километрическое уширение, обусловленное этим видом дисперсии? Как зависит уширение от длины волокна? Какова величина межмодовой

дисперсии в одномодовом ОВ? Можно ли пренебречь хроматической дисперсией в многомодовом волокне?

Из-за чего возникает ПМД? Почему она имеет случайный характер? Дайте определение дисперсионного параметра и назовите единицу его измерения. Укажите, как рассчитать уширение, обусловленное ПМД, в ОВ заданной длины. При каких скоростях передачи сигналов приходится всерьез считаться с ПМД?

24. Основные требования к источникам оптического излучения. Светоизлучающие диоды и их характеристики. Инжекционные лазерные диоды и их характеристики [2, с. 85-94; 3, ч. 2, пп. 65, 66].

Перечислите общие требования к источникам излучения. Назовите два вида источников, применяющихся в оптической связи. Изобразите схему простейшего СИД и объясните, как он работает. Что такое гетероструктура и каковы её полезные свойства? Перечислите основные характеристики СИД. От чего зависит рабочая длина волны? Какую (примерно) оптическую мощность он излучает? Какова ширина спектра излучения? Укажите достоинства, недостатки и область применения СИД.

Назовите условия возникновения лазерной генерации. Нарисуйте схему FP-лазера, объясните, как он работает. Изобразите его ватт-амперную и спектральную характеристики. Объясните, почему они имеют такую форму. Как осуществляют модуляцию излучения лазерного диода? Какие разновидности одномодовых ИЛД используют на практике? Укажите главное преимущество одномодового лазера перед многомодовым. Сравните светодиоды с лазерными диодами, сделайте вывод.

25. Структурная схема и принцип действия передающего оптического модуля [2, с. 94-98; 3, ч. 2, пп. 67, 68].

Изобразите структурную схему ПОМ с внутренней модуляцией оптической несущей и объясните, как она работает. Какой вид модуляции преимущественно используют в оптической связи? Почему внутренняя модуляция применяется только при сравнительно низких скоростях передачи? Нарисуйте структурную схему ПОМ с внешней модуляцией, поясните назначение элементов и характер их взаимодействия. На каких принципах основана работа оптического модулятора?

26. Структура, принцип действия и характеристики фотодетекторов. Структурная схема и принцип действия приёмного оптического модуля. Шумы приёмного оптического модуля [2, с. 109-120; 3, ч. 2, пп. 69, 70, 71].

Укажите назначение фотодетекторов и перечислите предъявляемые к ним требования. Изобразите структуру и поясните принцип действия PIN-фотодиода. Каковы его достоинства и недостатки? Нарисуйте структурную схему ЛФД. В чем состоит его главное отличие от PIN-фотодиода? Назовите его достоинства и недостатки. Дайте определения основным характеристикам фотодетекторов (квантовая эффективность, монохроматическая токовая чувствительность и др.).

Изобразите структурную схему ПРОМ. Объясните принцип действия трансимпедансного усилителя (ТИУ). Как найти частоту среза его АЧХ? Как рассчитать сопротивление резистора обратной связи? Как определить напряжение сигнала на выходе ПРОМ, зная величину входной оптической мощности?

Назовите две главные составляющие шумов ПРОМ. Объясните физическую природу каждой из них. Приведите определение коэффициента шума усилителя. Рассчитайте действующие значения напряжений составляющих шумов на выходе ПРОМ.

27. Расчет максимальной протяженности регенерационного участка [2, с. 320-322, формула (9.6); 3, ч. 2, п. 73].

Назовите главные факторы, ограничивающие длину регенерационного участка (при отсутствии усилителей и компенсаторов дисперсии). Рассчитайте максимальную протяженность регенерационного участка.

28. Оптические усилители и их характеристики [2, разд. 3.5; 3, ч. 2, п. 74].

Укажите назначение оптического усилителя. Изобразите упрощенную структурную схему усилителя на примесном волокне (EDFA) и энергетическую диаграмму, поясняющую его принцип действия. Перечислите основные характеристики ОУ. Что такое ASE? Рассчитайте мощность оптического шума на выходе усилителя и уровень шума, приведённый к его входу.

29. Пассивные оптические компоненты [2, разд. 2.3-2.6; 3, ч. 2, п. 75].

При ответе на вопрос необходимо назвать каждый из оптических компонентов, указать его назначение и основные характеристики. Обратите внимание на оптические кроссы, перечислите их главные достоинства.

30. Основные принципы спектрального разделения оптических сигналов. Структурная схема и принцип действия оптической ЦСП с DWDM [2, гл. 8, рис. 8.3, 9.7, 9.12 и поясняющий эти рисунки текст; 3, ч. 2, п. 76].

Перечислите достоинства оптических систем со спектральным разделением. Назовите два класса этих систем. В каких диапазонах они работают? Какую полосу отводят на один спектральный канал в системах CWDM? В системах DWDM? Объясните принцип действия оптического мультиплексора/демультиплексора. Рассчитайте ширину спектра оптического сигнала в одном канале. Почему FP-лазер нельзя использовать при DWDM? Какие главные требования предъявляют к источникам излучения в системах с плотным волновым мультиплексированием?

Изобразите структурную схему одного направления передачи оптической ЦСП с плотным волновым мультиплексированием и топологией «последовательная линейная цепь». Укажите назначение каждого из её элементов. Что такое ОМВВ и когда возникает необходимость в его установке? Почему в бустерах не предусмотрены компенсаторы дисперсии? Какие факторы влияют на расстояния между оптическими усилителями? Чем ограничено их количество в цепочке?

## **СОДЕРЖАНИЕ ОБЗОРНЫХ ЛЕКЦИЙ, ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА И ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ. ПОРЯДОК СДАЧИ ЭКЗАМЕНА**

На обзорных лекциях рассматриваются отдельные вопросы разделов дисциплины «Цифровые системы передачи» (ЦСП), главным образом, в форме комментариев к конспекту лекций доцента С.В.Чёткина [3]. **Поэтому важно иметь этот конспект перед глазами во время занятий или в виде бумажной копии, или в виде электронного ресурса.**

Практические занятия посвящены решению задач. Формулировки типовых задач и ответы к ним приведены в приложениях А и Б. Целесообразно прорешать их самостоятельно в межсессионный период, руководствуясь теоретическими материалами конспекта лекций [3].

Лабораторные работы выполняются в одной из лабораторий кафедры многоканальных телекоммуникационных систем (ауд. А-156). Описания работ находятся там же. В журнале преподаватели делают отметку о выполненных работах. Для получения зачета по лабораторным работам необходимо ответить на один из контрольных вопросов (по выбору преподавателя) каждой лабораторной работы.

### **Защита курсовой работы**

Требования к оформлению пояснительной записки курсовой работы приведены на с. 19.

После завершения самостоятельной работы по оформлению пояснительной записки курсовой работы студент отправляет её для предварительной проверки на электронный адрес руководителя курсовой работы или загружает её в ЭУ МТУСИ (электронный университет МТУСИ) в двух форматах: DOC и PDF, — за семь рабочих дней перед началом сессии. Прием курсовых работ на проверку завершается за три рабочих дня перед защитой курсовой работы.

Руководитель вносит свои замечания, делая соответствующие записи в комментариях в ЭУ МТУСИ, и принимает решение о допуске к защите с соответствующей записью. Руководитель может вернуть курсовую работу на доработку с указанием причин.

После устранения замечаний студент сдает пояснительную записку выполненной курсовой работы в бумажном виде руководителю или повторно загружает её в ЭУ МТУСИ в двух форматах: DOC и PDF.

Защита курсовых работ проходит по утвержденному графику перед комиссией в составе не менее двух человек, один из которых непосредственный руководитель. График проведения защит курсовых работ отображается в расписании занятий.

На защите студент отвечает на вопросы членов комиссии (по теоретическим аспектам, результатам работы в рамках содержания курсовой работы). Комиссия выявляет уровень профессиональных знаний, умений и навыков студента и степень его самостоятельности при выполнении курсовой работы.

Результат защиты оценивается как зачет с оценкой: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Оценка, выставленная комиссией по итогам защиты курсовой работы, записывается в ведомость. Студент, получивший на защите оценку «неудовлетворительно», допускается к повторной защите не ранее, чем через три дня.

Студенты, не защитившие курсовую работу по дисциплине, до экзамена по данной дисциплине не допускаются.

### **Экзамен**

К экзамену по дисциплине «Цифровые системы передачи» допускают студентов, выполнивших и защитивших курсовую работу и получивших зачет по лабораторным работам.

В случае отсутствия отчетности по лабораторным работам по дисциплине ЦСП студент во время экзамена должен ответить на дополнительные вопросы, связанные с тематикой лабораторных работ.

В экзаменационные билеты включены два вопроса из списка, аналогичного списку изучаемых тем, и задача. Во время сдачи экзамена студенты имеют право пользоваться копией своей курсовой работы, отчетами по лабораторным работам, методическими указаниями по дисциплине и учебными пособиями.

## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовую работу выполняют в точном соответствии с индивидуальным заданием, определяемым предпоследней и последней цифрами номера студенческого билета (AB). Например, если этот номер оканчивается на 07, значит  $A = 0$ ,  $B = 7$ ,  $(AB) = 7$ . Если номер студенческого билета оканчивается на 34, то  $A = 3$ ,  $B = 4$ ,  $(AB) = 34$  и т.п. Работа, выполненная даже частично не по заданному варианту, не будет отрецензирована и возвратится к студенту непроверенной и недопущенной к защите. В пояснительной записке курсовой работы приводят формулировки заданий и исходные данные. Расчеты снабжают краткими пояснениями. Вычисления приводят настолько подробно, насколько это необходимо для проверки их правильности. Результаты промежуточных вычислений по возможности не округляют.

Пояснительная записка курсовой работы выполняется в текстовом редакторе на листах формата А4 с полями: левое – 30 мм, правое – 10 мм, верхнее – 20 мм, нижнее – 25 мм. Шрифт: Times New Roman, размер – 14. Межстрочный интервал – 1,15. Абзацный отступ – 1,25 см. Основной текст выравнивается по ширине страницы. Названия разделов выравниваются влево и оформляются прописными (заглавными) буквами с полужирным выделением. Каждый раздел начинается с новой страницы. Названия подразделов выравниваются влево и оформляются строчными буквами с полужирным выделением. Расстояние между названием раздела и последующим текстом – три интервала. Расстояние между названием раздела и подраздела – три интервала.

Нумерация страниц начинается с титульного листа, на котором цифра «1» не проставляется. На следующей странице проставляется цифра «2» в центре нижнего поля документа. Далее весь последующий объем пояснительной записки нумеруется по порядку до последней страницы.

Все схемы, диаграммы и графики в пояснительной записке являются рисунками и могут быть черно-белыми или цветными. При необходимости, под рисунком могут располагаться поясняющие данные.

На все таблицы и рисунки в пояснительной записке должны быть ссылки в тексте в свободной форме. Например, «...представленные в таблице 2» или «...соответствующая диаграмма уровней изображена на рисунке 1». Таблицы или рисунки размещаются сразу после ссылки на них. Если на странице недостаточно свободного места, то рисунки или таблицы размещают на следующей странице.

Все таблицы имеют сквозную нумерацию арабскими цифрами и сопровождаются содержательным названием. Номер таблицы размещается в левом верхнем

углу над таблицей после слова «Таблица» (например, Таблица 2). Название таблицы размещается после её номера через тире, пишется с заглавной буквы и без точки в конце, как в таблице 2.

Таблица 2 – Кодовые комбинации для кода 2В1Q

Кодовая комбинация	Кодовый символ
00	-3
01	-1
10	+3
11	+1

Все рисунки имеют сквозную нумерацию арабскими цифрами и сопровождаются содержательным названием. Подрисуночная надпись выравнивается по центру страницы, как на рисунке 1. После слова «Рисунок» размещается номер рисунка и через тире размещается название рисунка с заглавной буквы и без точки в конце.

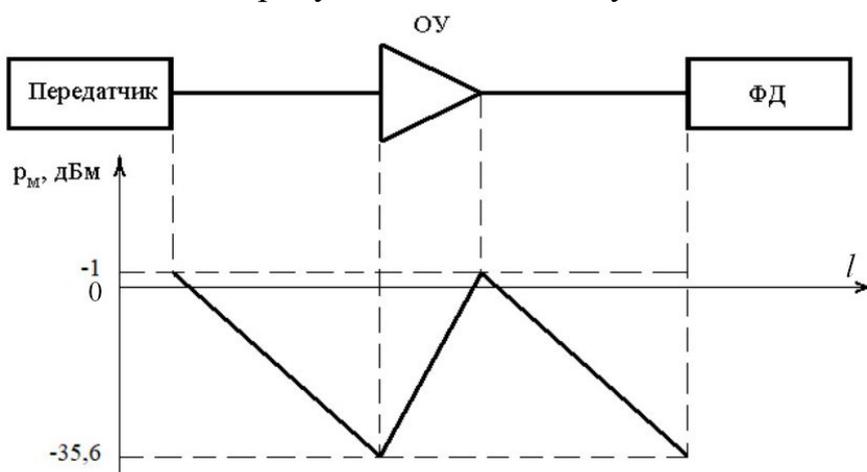


Рисунок 1 - Диаграмма уровней оптического линейного тракта

Формулы, на которые имеются ссылки в тексте, нумеруются последовательно арабскими цифрами. Номер формулы в круглых скобках помещают у правого края той же строки. Расшифровка всех буквенных обозначений должна приводиться непосредственно под формулой после слова «где» (без двоеточия).

Например, требуемая величина защищенности вычисляется по формуле:

$$A_{з, TP} = 4,63 + 11,42 \cdot 10 \lg \left( \lg \left( p_{ош}^{-1} \right) \right) + 20 \lg (L - 1) + \Delta A_з,$$

где  $p_{ош}$  – вероятность ошибки регенерации;  $L$  – число уровней кода в линии;  $\Delta A_з$  – запас защищенности, дБ.

Оформление пояснительной записки курсовой работы является трудоемкой задачей. Поэтому еще до начала сессии следует приступить к ее оформлению.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАНИЙ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Материал, необходимый для выполнения первого задания курсовой работы о линейных кодах, представлен в [3, ч. 1, пп. 36, 40, 41]. Диаграммы вычерчивают аккуратно, одну под другой на развороте двойного тетрадного листа в клетку, соблюдая такой масштаб по горизонтали, при котором одному тактовому интервалу соответствуют две клетки.

Временные диаграммы во втором задании вычерчивают на развороте двойного тетрадного листа в клетку аккуратно, в достаточно крупном масштабе: величина тактового интервала не менее двух клеток, высота импульса не менее четырех клеток. Диаграммы располагают одну под другой. На первой диаграмме изображают сигнал униполярный БВН для заданной двоичной последовательности длиной 24 бита. Сигнал униполярный БВН применяют в оптическом линейном тракте, при этом символу «1» соответствует импульс положительной полярности, занимающий весь тактовый интервал, а символу «0» — отсутствие импульса. На второй диаграмме изображают тот же сигнал в точке решения регенератора (ТРР) с учетом формы отклика на импульс сигнала БВН. Длительность отклика по основанию составляет два тактовых интервала, как изображено на рисунке 2. На диаграмме следует указать порог решения регенератора. Пунктиром показывают отклики на каждый единичный символ БВН-сигнала, а сплошной линией — результат их суммирования. Тактовые импульсы располагают на третьей диаграмме, их временные положения определяют моменты принятия решения регенератором, и поэтому важно импульсы правильно фазировать относительно сигнала в ТРР. На четвертой диаграмме строят сигнал униполярный БВН на выходе регенератора. **Диаграммы, выполненные небрежно, кое-как, будут возвращены для переработки.** По результатам построений следует сделать вывод о возможности (или невозможности) правильной регенерации сигнала при наличии межсимвольной помехи.

Третье задание выполняют после изучения материалов [3, ч. 1, пп. 22, 23, 24], а также [3, ч. 2, п. 46], где указаны необходимые для расчета параметры кадра STM-1. Время восстановления выражают в миллисекундах, а время удержания — не только в основных единицах (секундах), но и при необходимости в более крупных периодах: часах, сутках, годах.

Для выполнения четвертого задания достаточно материала в [3, ч. 2, пп. 63, 64, 73]. Коэффициент затухания рассчитывают, пренебрегая потерями в примесях, но учитывая кабельные потери. Чтобы выразить ширину спектра в единицах длины волны, можно воспользоваться формулой, приведенной в [3, ч. 2, п. 61].

Схему приемного оптического модуля (ПРОМ) для пятого задания берут из [3, ч. 2, п. 70]. Там же приведены формулы для расчета напряжения сигнала по заданной входной оптической мощности. Составляющие шума ПРОМ рассчитывают по формулам, указанным в [3, ч. 2, п. 71]. После получения окончательного результата необходимо сделать вывод: написать, какой шум преобладает и способен ли приемник в заданных условиях обеспечить требуемую вероятность ошибки регенерации.

Основой для расчета помехозащищенности в шестом задании являются формулы, указанные в [3, ч. 2, пп. 74, 76]. Для того чтобы выразить  $\Delta f$  через  $\Delta\lambda$ , пользуются формулами из [3, ч. 2, п. 61].

**СПРАВОЧНО:**

$$\exp(x) = e^x$$

$$\text{dec}(x) = 10^x$$

$\text{ent}(x)$  - целая часть числа  $x$

$10^{-2,5} = 10^{0,5} \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-3}$  - пример стандартной записи числа в показательной форме

## ЗАДАНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Методические указания по выполнению курсовой работы смотрите на с. 21.

### Задание 1

1. Взяв за основу заданную в таблице 3 двоичную последовательность из двадцати четырех символов, постройте на развороте двойного тетрадного листа в клетку временные диаграммы следующих видов сигналов:
- 1) без возвращения к нулю БВН (NRZ);
  - 2) без возвращения к нулю модифицированный БВНМ (NRZ-M);
  - 3) с чередованием полярностей импульсов ЧПИ (AMI);
  - 4) с высокой плотностью единиц КВП-3 (HDB-3);
  - 5) абсолютный биимпульсный код АБК (Bi-Phase-Level);
  - 6) относительный биимпульсный код ОБК (DBI);
  - 7) с инверсией токовых посылок ИТП (СМІ);
  - 8) алфавитный код 2В1Q.

2. Перечислите коды:

- а) обладающие хорошей способностью к самохронированию;
- б) наиболее защищенные от помехи;
- в) лучше других использующие полосу частот;
- г) малочувствительные к ограничению их спектра снизу.

3. Рассчитайте для заданного линейного кода ожидаемую вероятность ошибки в линейном регенераторе. Вид линейного кода задан в таблице 4. Требуемая защищенность сигнала от гауссовской помехи в точке решения регенератора (ТРР) равна

$$A_3 = 20 + \frac{(AB)}{10}, \text{ дБ.}$$

### Задание 2

Взяв за основу заданную в таблице 3 двоичную последовательность из двадцати четырех символов, представленную в линейном коде униполярный БВН, постройте временные диаграммы сигналов оптического линейного тракта в следующих контрольных точках:

- 1) на входе регенерационного участка;
- 2) на входе решающего устройства регенератора, в точке решения регенератора (ТРР);
- 3) на выходе выделителя тактовых импульсов;
- 4) на выходе регенератора.

На рисунке 2 показана форма нормализованного отклика в ТРР на импульс сигнала униполярный БВН длительностью один тактовый интервал  $T_T$ . Тактовые импульсы необходимо надлежащим образом сфазировать, а также показать положение порога решения. Сделайте вывод о возможности правильной регенерации сигнала.

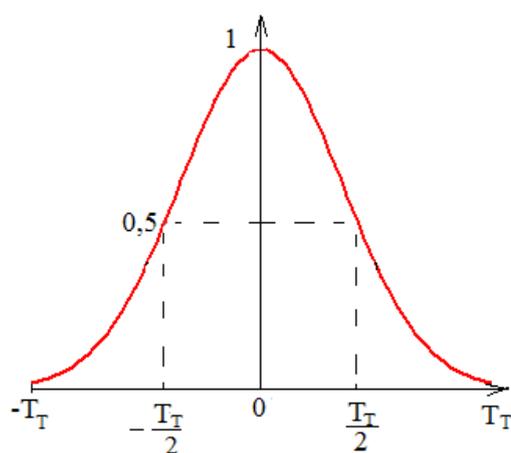


Рисунок 2 – Форма нормализованного отклика в ТРР на импульс сигнала БВН

Таблица 3 — Двоичная последовательность

Предпоследняя цифра номера студ. билета <b>A</b>	Первые двенадцать символов двоичной последовательности	Последняя цифра номера студ. билета <b>B</b>	Последние двенадцать символов двоичной последовательности
0	1000 0100 0000	0	0001 1111 0111
1	1100 0011 0000	1	0000 1010 1111
2	1111 0000 1000	2	0000 1000 0111
3	1000 0000 0100	3	0000 1110 1111
4	1110 0000 1000	4	1110 0001 1111
5	1000 0111 1000	5	0101 0000 1111
6	1010 1000 0100	6	0100 0010 0111
7	1101 0000 1100	7	0000 0000 1111
8	1001 0010 0000	8	0000 0101 0111
9	1000 1110 0000	9	0001 1000 0111

Таблица 4 - Линейный сигнал

Последняя цифра номера студ. билета <b>В</b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Линейный код	ВН	БВН	БВНМ	ЧПИ	КВП-3	АБК	ОБК	ИТП	ЗВ2Т	2В1Q

### Задание 3

1. Изобразите упрощенную структурную схему приемника циклового синхросигнала со скользящим поиском.
2. Рассчитайте среднее время удержания и среднее время восстановления состояния циклового синхронизма при использовании приемника синхросигнала со скользящим поиском. Предполагается, что искажения синхрослова, приводящие к ложной фиксации отсутствия циклового синхронизма, являются следствием случайных, независимых, одиночных битовых ошибок в линейном тракте.

Исходные данные для всех вариантов:

- цикл STM-1;
- синхрослово с одной критической точкой.

Остальные исходные данные возьмите из таблицы 5.

Таблица 5 — Исходные данные для задания 3 курсовой работы

Последняя цифра номера студ. билета <b>В</b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вероятность ошибки в линейном тракте	$10^{-4}$		$7 \cdot 10^{-5}$		$5 \cdot 10^{-5}$		$2 \cdot 10^{-5}$		$10^{-5}$	
Емкость накопителя по выходу из синхронизма	3	4	4	3	3	4	4	3	4	3
Емкость накопителя по входу в синхронизм	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1

### Задание 4

1. Оцените величины коэффициентов затухания и хроматической дисперсии стандартного одномодового ОВ (SF) на заданной волне оптического диапазона

$$\lambda = 1700 - 10 \cdot (AB), \text{ нм}.$$

2. Рассчитайте максимальную протяженность регенерационного участка оптической системы передачи, работающей на этой волне по стандартному одномодовому оптическому волокну.

Исходные данные для всех вариантов:

- суммарные потери в разъемных соединениях.....1 дБ,
- потери в одном сварном соединении.....0,1 дБ,
- строительная длина кабеля.....5 км.
- линейный код.....скремблированный БВН.

Остальные исходные данные возьмите из таблицы 6.

Таблица 6 — Исходные данные для задания 4 курсовой работы

Предпоследняя цифра номера студ. билета <b>A</b>	0 или 5		1 или 6		2 или 7		3 или 8		4 или 9	
Передаваемый цифровой поток	STM-16		STM-4		STM-1		STM-0		E4	
Энергетический потенциал оборудования, дБ	30		35		40		50		42	
Последняя цифра номера студ. билета <b>B</b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Среднеквадратическая ширина спектра оптической несущей, ГГц	15	22	18	17	23	16	20	24	19	21

### Задание 5

1. Изобразите упрощенную схему приемного оптического модуля.
2. Рассчитайте среднее значение напряжения цифрового сигнала и среднеквадратические (действующие) напряжения отдельно собственного и отдельно дробового шума на выходе ПРОМ с PIN фотодиодом в качестве фотодетектора.
3. Рассчитайте ожидаемую защищенность от суммарной помехи, сравните ее с допустимой, сделайте вывод. Исходные данные для всех вариантов:

- линейный код .....скремблированный БВН,
- рабочая температура.....комнатная,
- максимально допустимая вероятность ошибки регенерации..... $10^{-12}$ ,
- монохроматическая токовая чувствительность фотодиода.....1 А/Вт,
- коэффициент шума предусилителя.....2 (3 дБ).

Остальные исходные данные возьмите из таблицы 7.

Таблица 7 — Исходные данные для задания 5 курсовой работы

Предпоследняя цифра номера студ. билета <b>A</b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Входной уровень средней оптической мощности, дБм	-19	-25	-29	-27	-23	-21	-28	-18	-26	-20
Последняя цифра номера студ. билета <b>B</b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Передаваемый цифровой поток	STM-256		STM-64		STM-16		STM-4		STM-1	
Сопротивление резистора обратной связи ТИУ, Ом	20	25	80	120	300	400	1500	1700	6000	7000

### Задание 6

Рассчитайте отношение оптических сигнал/шум и величину помехозащищенности на выходе EDFA в полосе, равной ширине спектра оптического сигнала.

Исходные данные:

- средняя мощность сигнала на входе усилителя..... $(AB)+1$ , мкВт,
- битовая скорость БВН-сигнала,  
модулирующей оптическую несущую..... $155 \cdot ((AB)+1)$ , Мбит/с,
- полная ширина спектра оптической несущей..... $\frac{B+1}{10}$ , нм,
- коэффициент шума усилителя..... $4+\frac{A}{2}$ , дБ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордиенко В.Н., Тверецкий М.С. Многоканальные телекоммуникационные системы: учебник для вузов / 2-е изд. – М.: Горячая линия – Телеком, 2013.
2. Оптические телекоммуникационные системы: учебник для вузов / Под ред. В.Н. Гордиенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2011.
3. Цифровые телекоммуникационные системы плезиохронной и синхронной иерархий. Электронный конспект лекций. Ч. 1, 2 / С.В. Чёткин / МТУСИ. – М., 2013. Режим доступа:  
часть 1 - [https://lms.mtuci.ru/lms/local/mtt/elib\\_download.php?book\\_id=854](https://lms.mtuci.ru/lms/local/mtt/elib_download.php?book_id=854);  
часть 2 - [https://lms.mtuci.ru/lms/local/mtt/elib\\_download.php?book\\_id=2446](https://lms.mtuci.ru/lms/local/mtt/elib_download.php?book_id=2446).
4. Чёткин С.В. Основы построения инфокоммуникационных систем и сетей: конспект лекций / МТУСИ. - М., 2013.  
Режим доступа: [https://lms.mtuci.ru/lms/local/mtt/elib\\_download.php?book\\_id=836](https://lms.mtuci.ru/lms/local/mtt/elib_download.php?book_id=836)
5. Проектирование и техническая эксплуатация цифровых телекоммуникационных систем и сетей: учебное пособие для вузов / Е.Б. Алексеев, В.Н. Гордиенко, В.В. Крухмалев, А.Д. Моченов, М.С. Тверецкий; Под ред. В.Н. Гордиенко и М.С. Тверецкого. - 2-е изд., испр. - М.: Горячая линия – Телеком, 2017. - 392 с.: ил. ЭБС МТУСИ. Количество книг в библиотеке МТУСИ – 1. Режим доступа: [https://lms.mtuci.ru/lms/local/mtt/elib\\_download.php?book\\_id=1866](https://lms.mtuci.ru/lms/local/mtt/elib_download.php?book_id=1866)

**Типовые задачи**

Для самостоятельного решения задач приведены ссылки на рекомендуемые теоретические материалы в конспектах лекций доцента Чёткина С.В. [3; 4].

**Плещиохронная цифровая иерархия**

1. Аналоговые сигналы со спектрами в полосе 0..4 кГц и 1..4 кГц дискретизируют с периодом 100 мкс. Изобразите спектральные диаграммы дискретизированных сигналов [4, с. 81].
2. Спектр аналогового сигнала сосредоточен в полосе 30...50 кГц. Рассчитайте минимальную частоту дискретизации этого узкополосного сигнала в каждой из двух ситуаций:
  - а) без переноса спектра;
  - б) с переносом спектра вниз по частоте [3, ч. 1, п. 4].
3. Рассчитайте максимальную защищенность телефонного сигнала от помехи равномерного квантования, если количество уровней квантования равно 128 [3, ч. 1, п. 5].
4. Определите код, соответствующий напряжению  $U = -1000 \delta$ , где  $\delta$  - минимальный шаг квантования. Используется стандартная шкала квантования типа А [3, ч. 1, п. 6, табл. 2, рис. 12] .
5. Определите структуру кодового слова на выходе линейного кодера взвешивания. Исходные данные: входное напряжение 70 мВ, шаг квантования 2 мВ [3, ч. 1, п. 11] .
6. Рассчитайте напряжение на выходе линейного декодера. Исходные данные: код на входе 01 1010, шаг квантования 10 мВ [3, ч. 1, п. 12] .
7. Определите структуру кодового слова на выходе нелинейного кодера взвешивания. Исходные данные: входное напряжение  $500 \delta$ , где  $\delta$  - минимальный шаг квантования [3, ч. 1, п. 13].
8. Рассчитайте напряжение на выходе нелинейного декодера. Исходные данные: код на входе 0011 1101, минимальный шаг квантования 1 мВ [3, ч. 1, п. 14].
9. Задан код на входе цифрового компрессора 1101 0010 1101. Найти коды на выходах компрессора и экспандера [3, ч. 1, п. 15, табл. 4].

10. Цифровой поток E1 передают с помощью кода КВП-3. Рассчитайте длительность единичного элемента этого сигнала (одионого импульса) [3, ч. 1, п. 41].
11. Рассчитайте промежуток времени между двумя последовательными управляемыми проскальзываниями в потоке E1, если частота записи в буферную память отличается от частоты считывания на 1 Гц [3, ч. 1, п. 19].
12. Рассчитайте среднее время удержания состояния циклового синхронизма при следующих исходных данных:
- период повторения синхрослова.....250 мкс,
  - разрядность синхрослова.....7,
  - емкость накопителя по выходу из синхронизма.....3,
  - вероятность битовой ошибки..... $10^{-4}$
- [3, ч. 1, п. 24].
13. Оцените среднее время восстановления состояния циклового синхронизма при следующих исходных данных [3, ч. 1, п. 24]:
- период повторения синхрослова.....250 мкс,
  - емкость накопителя по выходу из синхронизма.....3,
  - емкость накопителя по входу в синхронизм.....1,
  - среднее время поиска синхрослова.....1,2 мс.
14. В цикле потока E2 с двусторонним выравниваем заданы КСС для каждого их четырех компонентных потоков E1: A, B, C, D.
- A – положительное выравнивание;  
 B – нейтральная команда;  
 C – отрицательное выравнивание;  
 D – нейтральная команда.
- Изобразите, как распределены символы каждого потока A1, A2, A3...B1, B2, B3...C1, C2, C3...D1, D2, D3... по позициям 5...20 последнего субцикла потока E2 [3, ч. 1, п. 29].
15. В цикле потока E2 с положительным выравниваем заданы КСС для каждого их четырех компонентных потоков E1: A, B, C, D.
- A – нейтральная команда;  
 B – команда выравнивания;  
 C – команда выравнивания;  
 D – нейтральная команда.
- Изобразите, как распределены символы каждого потока A1, A2, A3...B1, B2, B3...C1, C2, C3...D1, D2, D3... по позициям 5...20 последнего субцикла потока E2 [3, ч. 1, п. 29].

16. Рассчитайте ожидаемую величину защищенности сигнала от собственной помехи в ТРР [3, ч. 1, п. 35]. Исходные данные:
- скорость передачи сигнала ЧПИ.....20 Мбит/с,
  - длина регенерационного участка.....6 км,
  - коэффициент шума КУ.....5 дБ,
  - уровень передачи.....15 дБм,
  - коэффициент затухания цепи кабеля на полутаковой частоте.....12 дБ/км,
  - коэффициент сглаживания.....1.
17. Рассчитайте ожидаемую вероятность ошибки в линейном регенераторе. Исходные данные:
- линейный код.....КВП-3,
  - защищенность сигнала от гауссовской помехи в ТРР..... 20 дБ [3, ч. 1, п. 36].
18. Рассчитайте требуемую защищенность сигнала КВП-3 от гауссовской помехи в ТРР. Исходные данные:
- вероятность ошибки..... $10^{-10}$ ,
  - запас защищенности.....6 дБ [3, ч. 1, п. 36].
19. Оцените минимальные значения переходного затухания на ближнем конце и защищенности цепи на дальнем конце на частоте 5 МГц для кабеля МКС длиной 2,5 км при внутрочетверочных влияниях [3, ч. 1, п. 37].
- Исходные данные:
- коэффициент затухания на частоте 5 МГц.....5,7 дБ/км.
20. Рассчитайте среднее значение защищенности сигнала от переходной помехи в ТРР при двухкабельной схеме. Кабель одночетверочный с кордельно-полистерольной изоляцией. Исходные данные:
- скорость передачи сигнала ЧПИ.....16 Мбит/с,
  - длина регенерационного участка.....5 км [3, ч. 1, п. 37].
21. Рассчитайте среднее значение защищенности сигнала от переходной помехи в ТРР при однокабельной схеме. Кабель одночетверочный типа ЗК. Исходные данные:
- скорость передачи сигнала КВП-3.....2 Мбит/с,
  - затухание цепи на частоте 1 МГц.....25 дБ [3, ч. 1, с. 73, 76].

22. Рассчитайте максимальную протяженность участка регенерации, ограниченную собственной помехой. Исходные данные:
- коэффициент шума КУ.....6 дБ,
  - коэффициент сглаживания.....1,
  - коэффициент затухания цепи кабеля на частоте 1 МГц.....5,5 дБ/км,
  - тактовая частота сигнала КВП-3.....8,448 МГц,
  - уровень передачи.....20 дБм,
  - требуемая помехозащищенность.....30 дБ
- [3, ч. 1, п. 39].
23. Рассчитайте максимальную протяженность участка регенерации, ограниченную ПВБК. Исходные данные:
- скорость передачи сигнала КВП-3.....8,448 Мбит/с,
  - коэффициент затухания цепи кабеля ЗКПА 1x4x1,2 на частоте 1 МГц.....5,5 дБ/км,
  - запас защищенности.....3 дБ
- [3, ч. 1, п. 39, с. 61, 73, 77].

### **Синхронная цифровая иерархия**

1. Рассчитайте битовую скорость виртуального контейнера VC-12, если размер (емкость) контейнера C-12 равен 34 байтам [3, ч. 2, п. 44; 1, с. 155, табл. 6.2].
2. Рассчитайте битовую скорость нагрузочного блока TU-2, если размер (емкость) контейнера C-2 равен 106 байтам. Расчет провести для одного кадра, а не для мультикадра [3, ч. 2, п. 44, 45; 1, с. 155, табл. 6.2].
3. Рассчитайте битовую скорость административного блока AU-4, если размер (емкость) контейнера C-4 равен 2340 байтам [3, ч. 2, пп. 44, 45; 1, табл. 6.2].
4. Рассчитайте битовую скорость STM-1, исходя из размеров AU-4 (2358 байт) и секционных заголовков [3, ч. 2, пп. 45, 46].
5. Определите структуру первых 16 битов ПСП скремблера, если исходное состояние регистра сдвига таково: T1=0; T2=0; T3=1; T4=0; T5=0; T6=1; T7=1 [3, ч. 2, п. 47].
6. Определите структуру кодовых слов ВІР-2 и ВІР-8 для блока, состоящего из 16 символов: *1101 0101 1100 1011* [3, ч. 2, п. 58].

7. Рассчитайте волну отсечки высших мод оптического волокна типа SF. Исходные данные:
- показатель преломления сердцевины ОВ.....1,468,
  - показатель преломления оболочки.....1,463,
  - диаметр сердцевины.....8,3 мкм
- [3, ч. 2, п. 62].
8. Оцените удельные потери (дБ/км) в одномодовом ОВ на волне 1,55 мкм, обусловленные релеевским рассеянием и молекулярным (инфракрасным) поглощением [3, ч. 2, п. 63].
9. Оцените величину коэффициента хроматической дисперсии на верхней граничной волне длинноволнового диапазона  $L$  для одномодового оптического волокна SF [3, ч. 2, пп. 62, 64].
10. Накопленная на некотором участке хроматическая дисперсия составила 2550 пс/нм. Сколько потребуется компенсирующего волокна с коэффициентом дисперсии  $-340$  пс/(нм·км) и километрическим затуханием 1,56 дБ/км, чтобы полностью ее компенсировать? Рассчитайте затухание, вносимое компенсирующим волокном [3, ч. 2, п. 64].
11. Рассчитайте дифференциальную модовую задержку (уширение) в многомодовом ОВ длиной 2 км с коэффициентом широкополосности 500 МГц·км. Хроматической дисперсией пренебречь [3, ч. 2, п. 64].
12. СИД работает на длине волны 0,85 мкм и излучает в полосе частот 20 ТГц. Выразите ширину спектра излучения в нанометрах [3, ч. 2, п. 61, с. 57].
13. ИЛД работает на длине волны 1,55 мкм и излучает в полосе 1 нм. Выразите ширину спектра излучения в гигагерцах [3, ч. 2, п. 61, с. 57].
14. Рассчитайте величину фототока PIN фотодиод, если оптическая мощность на длине волны 1,55 мкм равна 1 мкВт, а квантовый выход на этой волне составляет 70% [3, ч. 2, п. 69].
15. Рассчитайте среднее значение напряжения сигнала на выходе трансимпедансного усилителя ТИУ при следующих исходных данных:
- уровень средней оптической мощности сигнала на входе ПРОМ.....-20 дБм,
  - монохроматическая токовая чувствительность PIN фотодиода.....1 А/Вт,
  - ширина полосы частот.....1 ГГц,
  - сопротивление резистора обратной связи ТИУ.....300 Ом
- [3, ч. 2, пп. 69, 70].

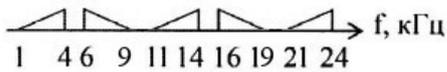
16. Рассчитайте действующее значение напряжения суммарной помехи на выходе ПРОМ при комнатной температуре (тепловой и дробовой шумы). Исходные данные:
- средняя мощность входного оптического сигнала.....10 мкВт,
  - монохроматическая токовая чувствительность PIN фотодиода.....1 А/Вт,
  - ширина полосы частот.....1 ГГц,
  - сопротивление резистора обратной связи ТИУ.....1 кОм
- [3, ч. 2, п. 71].
17. Рассчитайте максимальную длину регенерационной секции, ограниченную затуханием. Исходные данные:
- энергетический потенциал оборудования.....35 дБ,
  - затухание всех разъемных соединений.....1 дБ,
  - потери в одном неразъемном соединении.....0,1 дБ,
  - коэффициент затухания оптического волокна.....0,25 дБ/км,
  - строительная длина кабеля.....5 км
- [3, ч. 2, п. 73].
18. Рассчитайте максимальную длину регенерационной секции, ограниченную хроматической дисперсией, для многомодового ИЛД и линейного кода БВН. Исходные данные:
- рабочая длина волны.....1,55 мкм,
  - передаваемый цифровой поток.....STM-4,
  - коэффициент дисперсии ОВ.....18 пс/(нм·км),
  - полная ширина спектра оптической несущей.....3 нм
- [3, ч. 2, п. 73].
19. Рассчитайте отношение оптических сигнал/шум и величину помехозащищенности (в дБ) на входе оптического усилителя EDFA. Исходные данные:
- коэффициент шума ОУ.....6 дБ,
  - шумовая полоса.....0,8 нм,
  - уровень сигнала на входе ОУ.....-23 дБм
- [3, ч. 2, п. 74 и с. 57].
20. Оцените полную ширину спектра оптического сигнала STM-64 (в ГГц и нм), если ширина спектра оптической несущей составляет 0,1 нм. Рабочая длина волна 1,55 мкм [3, ч. 2, п. 73 и с. 57].

Ответы на задачи

**Плещиохронная цифровая иерархия**



1.



2. а) 50 кГц; б) 40 кГц
3. 33 дБ
4. 01101111
5. 1100010 или 1100011
6. -265 мВ
7. 11011111
8. -118 мВ
9. 1111 0100; 1101 0010 0000
10. 244 нс
11. 512 с
12. 202 час
13. 2,2 мс

14.

5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
		C1			B1	C2	D1	A1	B2	C3	D2	A2	B3	C4	D3

15.

5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
A1			D1	A2	B1	C1	D2	A3	B2	C2	D3	A4	B3	C3	D4

16. 36,4 дБ
17.  $5 \cdot 10^{-7}$
18. 28 дБ
19. 28 дБ; 25 дБ
20. 30 дБ
21. 26 дБ
22. 7,4 км
23. 2 км

**Синхронная цифровая иерархия**

1. 2240 кбит/с
2. 6912 кбит/с
3. 150912 кбит/с
4. 155520 кбит/с
5. 1100 1000 1011 0011
6. 00; 0001 1110
7. 1,3125 мкм
8.  $\alpha_p \approx 0,13$  дБ/км;  
 $\alpha_{ик} \approx 0,019$  дБ/км
9. 22,3 пс/(нм · км)
10. 7,5 км; 11,7 дБ
11. 3,2 нс
12. 48 нм
13. 125 ГГц
14. 0,875 мкА
15. 3 мВ
16. 139 мкВ
17. 125,9 км
18. 20,5 км
19. 20 дБ; 100
20. 32,5 ГГц;  
0,26 нм

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**

**Пример титульного листа отчета по лабораторной работе**

**МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ  
КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение высшего образования

**Московский технический университет связи и информатики**

---

Кафедра многоканальных телекоммуникационных систем

**Лабораторная работа № \_\_\_\_**

по дисциплине

**Цифровые системы передачи**

**ИЗУЧЕНИЕ ОКОНЕЧНОЙ СТАНЦИИ ПЕРВИЧНОЙ ЦСП**

Студ. билет № \_\_\_\_\_

Выполнил:

студент гр. \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(Ф.И.О.)

Проверил:

\_\_\_\_\_  
(должность, Ф.И.О.)

Москва 20\_\_

Пример титульного листа пояснительной записки курсовой работы

**МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ  
КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение высшего образования

**Московский технический университет связи и информатики**

---

Кафедра многоканальных телекоммуникационных систем

**КУРСОВАЯ РАБОТА**

по дисциплине

**Цифровые системы передачи**

на тему

**СИНХРОННАЯ ЦИФРОВАЯ ИЕРАРХИЯ  
И ОПТИЧЕСКИЙ ЛИНЕЙНЫЙ ТРАКТ**

Студ. билет № \_\_\_\_\_

Выполнил:

студент гр. \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(Ф.И.О.)

Проверил:

\_\_\_\_\_  
(должность, Ф.И.О.)

Москва 20\_\_

**Учебно-методическое пособие**

по дисциплине

# **ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ**

Для студентов 4 курса ЦЗОПБ

**Направление подготовки: 11.03.02**

---

Подписано в печать 25.05.2022г. Формат 60x90 1/16.

Объём 2,4 усл.п.л. Изд. № 34.

---



**ВЫГОДНО. УДОБНО.  
НАДЕЖНО**

**ИНТЕР-**



**НЕТ**

**WI-FI**

**СТАБИЛЬНАЯ СКОРОСТЬ**

**НАДЕЖНОЕ СО-**

**ЕДИНЕНИЕ**



**ТЕЛЕВИДЕНИЕ**

**ИНТЕРЕСНЫЕ ТЕЛЕКАНАЛЫ СО  
ВСЕГО МИРА НА РАЗНЫХ ЯЗЫКАХ**

**HDTV**

**WWW.AKADO.RU**

**ОАО «КОМКОР», 117535, РОССИЯ, МОСКВА, ВАРШАВСКОЕ ШОССЕ, 133  
ЛИЦЕНЗИИ № 123058, 123059, 123056, 123057, 153190, 153191, 153189,  
123060**