

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 28.04.2026 13:33:20

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabb13e91bdc44891ca560089

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра информационной безопасности

УТВЕРЖДАЮ:
Проректор по учебной работе
О.Г. Локтионова
« 20 » 04 2026 г.



МНОГОКАНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Методические указания по выполнению практических работ

Курск 2026

УДК 621.396.4

Составители: Ю.В. Шуклина

Рецензент

Доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры информационной безопасности
А. А. Гуламов

Многоканальные системы передачи данных: методические указания по выполнению практических работ / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: сост. Ю.В. Шуклина – Курск, 2026. – 34 с.

В методических указаниях представлен теоретический материал и практические задания, охватывающие основные этапы преобразования, передачи и восстановления сигналов в цифровых системах связи. Рассматриваются процессы дискретизации и квантования аналоговых сигналов, исследование системы связи с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ), методы формирования линейных кодов в цифровых трактах, принципы регенерации сигналов для увеличения дальности связи. А также расчет параметров, влияющих на помехоустойчивость и достоверность передачи информации.

Полученные знания в результате выполнения практических работ дадут возможность сформировать компетенции анализа и проектирования узлов цифровых систем передачи, понимания механизмов возникновения искажений и помех, а также методов их компенсации.

Предназначены для студентов очной формы обучения, обучающихся по направлению подготовки 10.05.02 Информационная безопасность телекоммуникационных систем при изучении дисциплины «Многоканальные системы передачи данных». Представляют интерес для студентов и аспирантов всех направлений подготовки и специальностей технического и экономического направлений.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 20.03.26. Формат 60х84 1/16.
Усл. печ. л. 1,98. Уч.-изд. л. 1,79. Тираж 100 экз. Заказ 315 Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

СОДЕРЖАНИЕ

Практическая работа №1. Исследование процессов дискретизации и квантования при аналого-цифровом преобразовании сигналов	4
Практическая работа №2. Исследование системы связи с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ)	10
Практическая работа №3. Формирование кодов в цифровых линейных трактах	20
Практическая работа №4. Регенерация сигналов в цифровых линейных трактах	24

Практическая работа №1. Исследование процессов дискретизации и квантования при аналого-цифровом преобразовании сигналов

1 Цель работы

Изучить принципы дискретизации по времени и аналого-цифрового преобразования сигналов, а также оценить влияние параметров дискретизации и квантования на качество получаемого цифрового сигнала.

2 Краткие теоретические сведения

Аналоговый сигнал, поступающий на вход канала связи любой цифровой телекоммуникационной системы, в том числе и оптической, посредством операций дискретизации по времени, квантования по уровню и кодирования, преобразуется в цифровой сигнал. Любая ОЦТС характеризуется параметром помехозащищенности или помехоустойчивости, который определяет способность цифровой системы передачи обеспечивать правильное функционирование в условиях воздействия шумов и помех искусственного и естественного происхождения. Чем выше параметр помехозащищенности, тем выше вероятность принять полезный (информационный) сигнал.

Дискретизация по времени

При дискретизации непрерывного сигнала по времени передается не весь сигнал, а только его амплитудные значения, взятые через промежутки времени, называемые периодом дискретизации (рисунок 1).

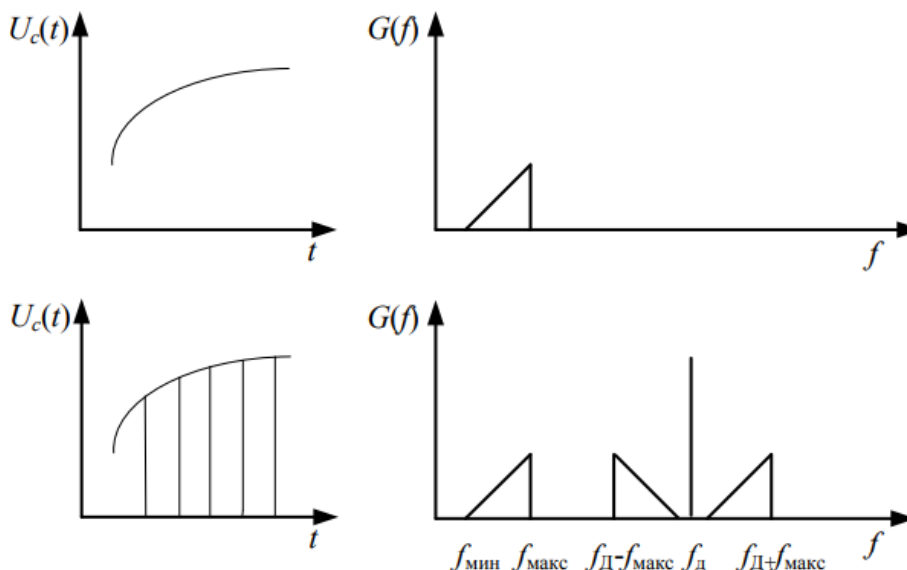


Рисунок 1 – Дискретизация непрерывного сигнала по времени и его спектр

Причем период дискретизации выбирается таким образом, чтобы передаваемый дискретными отсчетами сигнал мог быть восстановлен практически без искажения.

Частотный спектр последовательности отсчетов $U_{\text{АИМ}}$ содержит:

1. модулирующий сигнал;
2. частоту дискретизации и ее гармоники;
3. боковые полосы частот около частоты дискретизации и ее гармоник.

Если спектр исходного сигнала ограничен частотой $f_{\text{макс}}$, то демодуляция АИМ-сигнала возможна с помощью фильтра нижних частот, который выделяет только низкочастотную составляющую спектра. Этот фильтр должен иметь частоту среза $f_{\text{ср}} = f_{\text{макс}}$. Выделить исходный сигнал возможно лишь в том случае, если выполняется условие теоремы Котельникова $f_{\text{д}} = 2f_{\text{макс}}$ – это условие можно применить лишь для фильтров с идеальной характеристикой (рисунок 2).

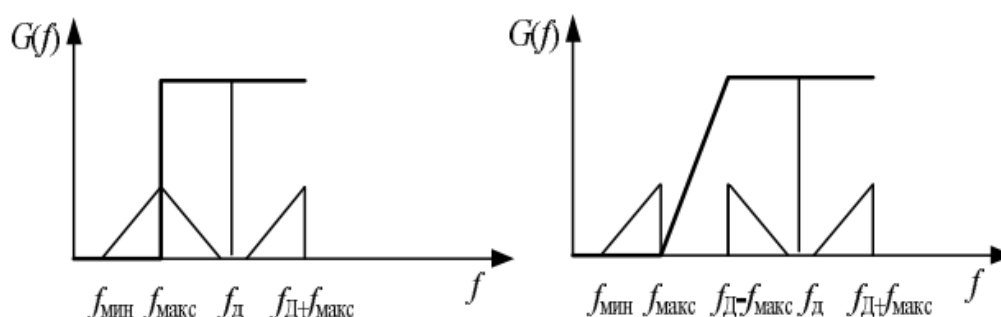


Рисунок 2 – Восстановление непрерывного сигнала в тракте приема

Для фильтров с реальной характеристикой и имеющих полосу расфильтровки $f_{\text{д}} \geq 2f_{\text{макс}}$ частоту дискретизации выбирают обычно $f_{\text{д}} = (2,3 \dots 2,4) f_{\text{макс}}$.

Например, при дискретизации сигнала для канала тональной частоты со спектром 0,3...3,4 кГц частота дискретизации выбирается $f_{\text{д}} = 8$ кГц. В этом случае полоса расфильтровки применяемого ФНЧ $f_{\text{р}} = 1,2$ кГц, что снижает требования к крутизне нарастания затухания.

Аналого-цифровое преобразование

Полученный в результате дискретизации по времени АИМ-сигнал является аналоговым, так как амплитуды отсчетов изменяются аналогично изменению амплитуды исходного сигнала. Таким образом, амплитуды импульсов АИМ-сигнала соответствуют амплитуде сигнала в момент отсчета, причем значений амплитуд может быть бесконечное множество. Искажения и шумы, возникающие в линейном тракте, прежде всего изменяют амплитуды импульсов. На приемной станции отличить полезный сигнал невозможно, так как все значения амплитуды являются разрешенными. Помехоустойчивость системы передачи, использующих АИМ, очень низка.

Повышение помехозащищенности передачи информации возможно путем применения цифровых методов модуляции.

Аналого-цифровое преобразование может быть обеспечено импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ), дифференциальной ИКМ (ДИКМ), дельта-

модуляцией (ДМ).

ИКМ-сигнал образуется из непрерывного в 3 этапа:

1. дискретизация исходного сигнала по времени;
2. квантование непрерывных отсчетов по уровню;
3. кодирование квантованных отсчетов.

При квантовании по уровню диапазон возможных значений сигнала делится на отрезки, называемые шагами квантования. Внутри каждого шага выбирают разрешенные значения сигнала – уровни квантования (рисунок 3).

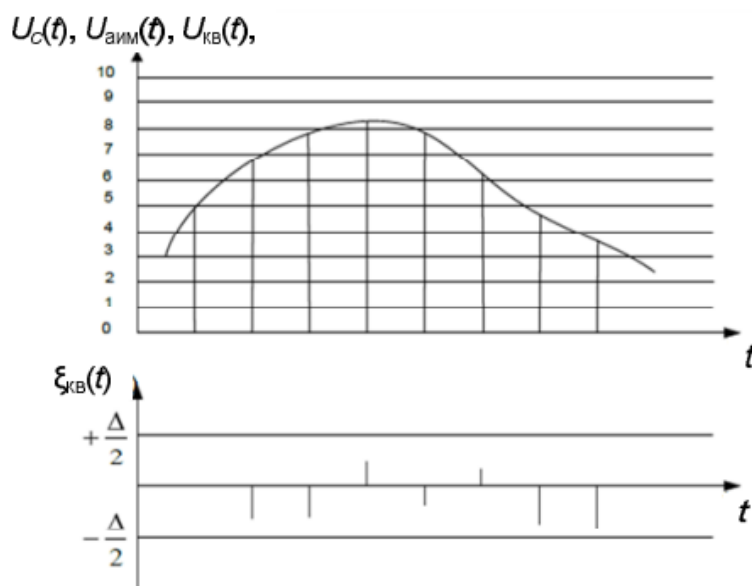


Рисунок 3 – Дискретизация исходного сигнала по времени и квантование непрерывных отсчетов по уровню

Амплитуда каждого отсчета $U_{ам}(t)$ округляется до значения ближайшего уровня квантования, и отсчету присваивается значение величины разрешенного уровня $U_{кв}(t)$. Амплитуды квантованных импульсов отличаются от амплитуды отсчетов, что приводит к искажению сигнала, а на приемном конце возникают помехи, которые называют шумом квантования.

Ошибка квантования может быть определена как

$$\xi_{кв}(t) = U_{ам}(t) - U_{кв}(t).$$

Максимальная ошибка квантования $\xi_{квmax} = \Delta/2$. Чем меньше шаг квантования, тем меньше ошибка квантования. Мощность шума квантования $P_{ш.кв} = \Delta^2/12$.

Неравномерное квантование. Качество передачи информации оценивают показатели помехозащищенности:

$$A_{з.кв} = P_c - P_{ш.кв}.$$

Из формулы следует, что если шум квантования величина постоянная,

то с уменьшением уровня сигнала уменьшается помехозащищенность от шумов квантования.

С учетом того, что сигналы с меньшей интенсивностью появляются чаще, необходимо, чтобы шаг квантования слабых сигналов был меньше, т.е. квантование должно быть неравномерным (рисунок 4).

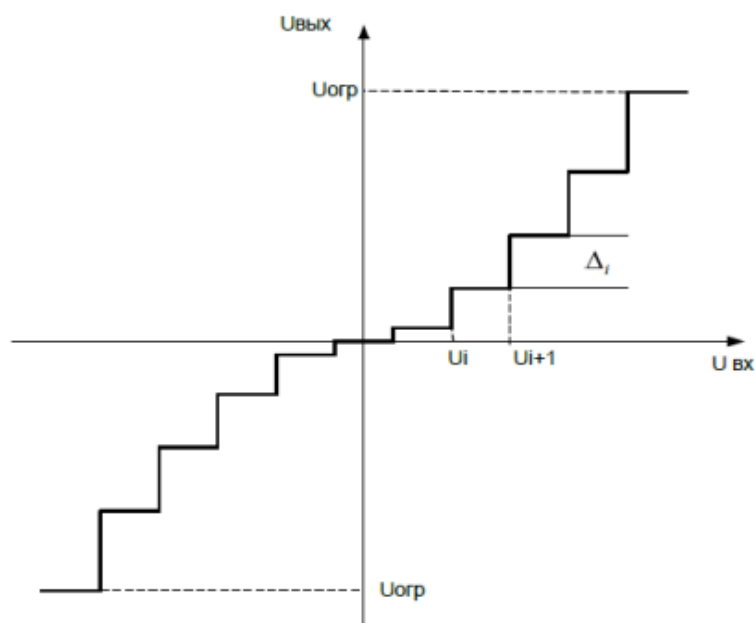


Рисунок 4 – Неравномерное квантование

3 Задание на практическую работу

1. Выбрать частоту дискретизации F_d первичного сигнала, спектр которого ограничен частотами f_n и f_b . Для выбранной частоты дискретизации построить спектральную диаграмму АИМ-сигнала.

Вариант	Значения f_n	Значения f_b
1	50	80
2	10	12
3	1	4
4	3	6
5	5	15
6	12	15
7	20	50
8	1	15
9	7	10
10	6	10
11	12	16
12	20	30
13	18	22

14	24	30
15	2	5
16	5	9
17	7	12
18	13	15

2. Выполнить операции равномерного квантования с шагом $\delta = 1$ В и кодирования в восьмиразрядном симметричном коде двух отсчетов аналогового сигнала с амплитудами U_1 и U_2 . Определить величины ошибок (шумов) квантования. Изобразить полученные в результате кодирования кодовые слова (кодовые комбинации) в виде последовательности токовых и бестоковых посылок, считая, что двоичной единице соответствует токовая посылка, а нулю - бестоковая.

Вариант	Значения U_1	Значения U_1
1	16	-8
2	-10	20
3	5	-17
4	-8	11
5	12	-13
6	-16	25
7	4	-5
8	-17	15
9	22	-2
10	-2	7
11	40	-32
12	-31	1
13	21	-4
14	-7	12
15	5	-15
16	-11	3
17	9	-8
18	-17	5

3. Выполнить операции равномерного квантования с шагом $\delta = 0,3$ и кодирования в восьмиразрядном симметричном коде двух отсчетов аналогового сигнала с амплитудами U_1 и U_2 . Определить величины ошибки квантования. Изобразить полученные в результате кодирования кодовые комбинации в виде последовательности токовых и бестоковых посылок.

Вариант	Значения U_1	Значения U_1
1	15,1	-5,8
2	12,8	-26,4
3	22,5	-6,7

4	13,9	-3,4
5	7,1	-7,6
6	3,5	-1,5
7	6,2	-12,6
8	4,9	-2,9
9	24,5	-22,1
10	32,4	-13,6
11	12,5	-1,2
12	5,8	-3,6
13	4,2	-13,4
14	3,1	-11,7
15	11,4	-9,4
16	15,3	-22,9
17	3,4	-9,3
18	25,7	-6,5

4. Найдите минимальную теоретическую частоту дискретизации F_s , позволяющую избежать наложения, для полосового сигнала с частотными компонентами в диапазоне $X < f < Y$.

Вариант	Значения X	Значения Y
1	20	30
2	30	45
3	19	30
4	10	29
5	14	40
6	16	30
7	12	32
8	22	25
9	14	24
10	10	20
11	11	30
12	15	20
13	20	25
14	21	30
15	25	40
16	30	50
17	1	5
18	5	10

4 Контрольные вопросы

1. Сформулируйте теорему Котельникова-Найквиста. Каково ее значение для выбора частоты дискретизации?

2. Что такое алиасинг (наложение спектров)? Как он возникает и какие последствия имеет для восстановленного сигнала? Какие методы существуют для его предотвращения?

3. В чем заключается процесс квантования? Что такое уровни квантования и шаг квантования?

4. Объясните разницу между равномерным и неравномерным квантованием. В каких случаях целесообразно использовать неравномерное квантование?

5. Что такое кодирование в процессе АЦП? Какова его цель и какие методы кодирования вы знаете?

6. Как влияет шаг квантования на величину шума квантования?

Библиографический список

1. Марьев, А. А. Методы и устройства цифровой обработки сигналов. Дискретизация. Квантование. Цифровой анализ сигналов / А. А. Марьев. – Ростов-на-Дону - Таганрог : Южный федеральный университет, 2020. – 132 с.

2. Помехоустойчивость устройств приёма сигналов в цифровых системах связи / В. Г. Довбня, Д. С. Коптев, В. Г. Андронов, А. А. Чуев. – Курск : Юго-Западный государственный университет, 2025. – 239 с.

Практическая работа №2. Исследование системы связи с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ)

1 Цель работы

- изучить процесс функционирования и освоить управление лабораторной установкой;
- сформировать заданное множество сигналов с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ), изучить их особенности и определить параметры;
- получить и исследовать групповой сигнал из сигналов с АИМ, применяя временное разделение каналов;
- проконтролировать процесс разделения сигналов с АИМ в приемной части установки. Оценить качество разделения;
- оценить качество восстановления передаваемых сигналов с помощью фильтров низких частот.

2 Краткие теоретические сведения

Цифровые системы передачи (ЦСП), используемые в телекоммуникационных сетях, строятся на основе определенной иерархии, которая должна удовлетворять следующим основным требованиям:

1. Передача по каналам и трактам ЦСП всех видов аналоговых, дискретных и цифровых сигналов.

2. Соответствующая кратность скоростей обработки и передачи сигналов на различных ступенях передачи.

3. Возможность достаточного простого объединения, разделения, выделения и транзита передаваемых цифровых потоков.

4. Параметры ЦСП должны выбираться с учётом характеристик существующих и перспективных направляющих систем.

5. Возможность взаимодействия ЦСП с аналоговыми системами передачи и различными системами коммутации.

6. При передаче сигналов типовых сообщений пропускная способность ЦСП должна использоваться наилучшим образом.

Формирование иерархии ЦСП осуществляется на основе объединения цифровых потоков низкого порядка, называемых компонентными, в единый цифровой, называемый групповым. Формирование группового цифрового сигнала возможно следующими способами объединения цифровых потоков: посимвольное (рисунок 1, а) и поканальное (рисунок 1, б).

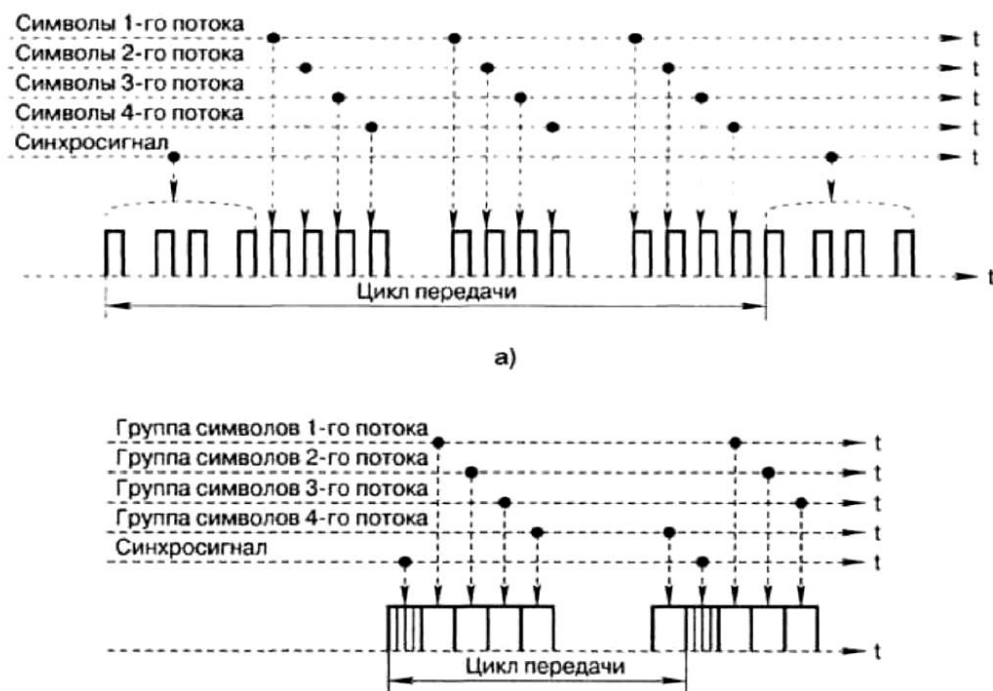


Рисунок 1 – Структура цикла цифровой системы передачи с посимвольным (а) и с поканальным (б) объединением цифровых потоков

В обоих случаях объединяются 4 потока.

При посимвольном объединении импульсы цифровых сигналов объединяемых цифровых потоков укорачиваются и распределяются во времени так, чтобы в освободившихся интервалах могли разместиться объединяемые импульсы других потоков.

При поканальном объединении цифровых потоков сужаются и распределяются во времени интервалы, отводимые для кодовых групп. Синхросигнал необходим для правильного распределения цифровых потоков на приемном конце.

Возможно объединение цифровых потоков по циклам, которое аналогично поканальному объединению, только обрабатывается (сжимается) во времени и передается полностью цикл одного цифрового потока, а потом следующих. Наиболее простым и широко применяемым способом является способ посимвольного объединения.

Объединение цифровых потоков осуществляется в оборудовании временного группообразования, или мультиплексирования, принцип построения которого приведен на рисунок 2.

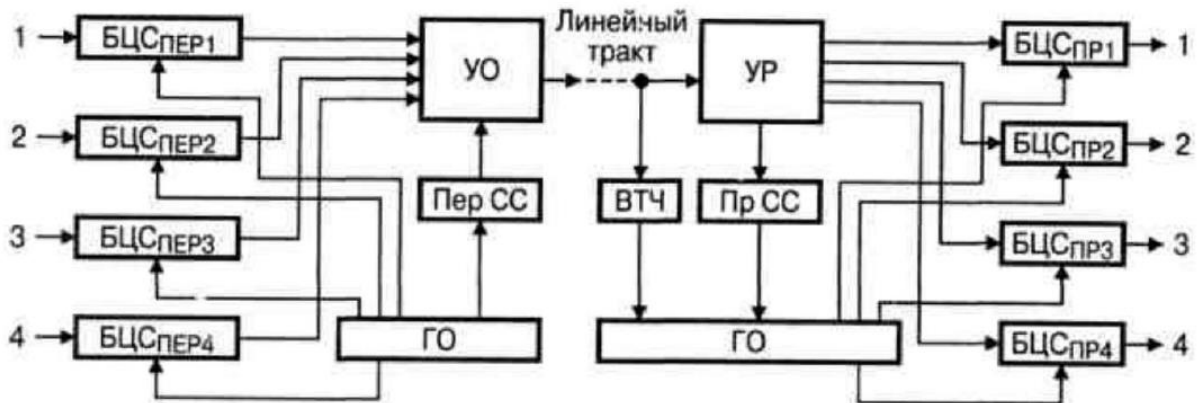


Рисунок 2 – Принцип построения оборудования временного группообразования – мультиплексирования

В состав оборудования входят:

- блоки цифрового сопряжения тракта передачи и приема БЦСпер, БЦСпр;
- устройства объединения УО в тракте передачи и разделения УР в тракте приема потоков;
- передатчик и приемник синхросигнала Пер СС, Пр СС;
- выделитель тактовой частоты (ВТЧ) линейного цифрового сигнала;
- генераторное оборудование (ГО) передающей и приемной станций.

Сигналы с выходов БЦСпер совместно с сигналами цикловой синхронизации поступают на вход УО. Временной сдвиг между импульсными последовательностями на выходах БЦСпер обеспечивается управляющими импульсами с ГО. На приеме УР распределяет импульсы группового сигнала по своим БЦСпр, а также сигналы Пр СС.

Генераторное оборудование систем передачи более низкого порядка может работать либо независимо от оборудования объединения и разделения цифровых потоков, либо должна обеспечиваться синхронизация общим задающим генератором. В зависимости от этого объединение цифровых потоков может быть асинхронным или синхронным.

При синхронном объединении цифровых потоков скорости записи в БЦС и скорости считывания этой информации из БЦС будут постоянными и кратными, так как вырабатываются одним и тем же ГО. При этом между командами записи и считывания должен быть установлен требуемый временной сдвиг, чтобы считывание информации происходило после ее

поступления в БЦСпер.

При асинхронном объединении цифровых потоков, когда ГО устройств объединения цифровых потоков и ГО устройств формирования цифровых потоков низшего порядка работают независимо, возможно некоторое расхождение между скоростями записи и считывания. Для согласования этих скоростей необходимо принимать соответствующие меры.

Установка «Изучение принципов временного разделения каналов (ЦСК-1)» выполнена в настольном варианте. Она рассчитана на питание от сети переменного тока 220 В, 50 Гц. Лицевая панель установки изображена на рисунке 3.

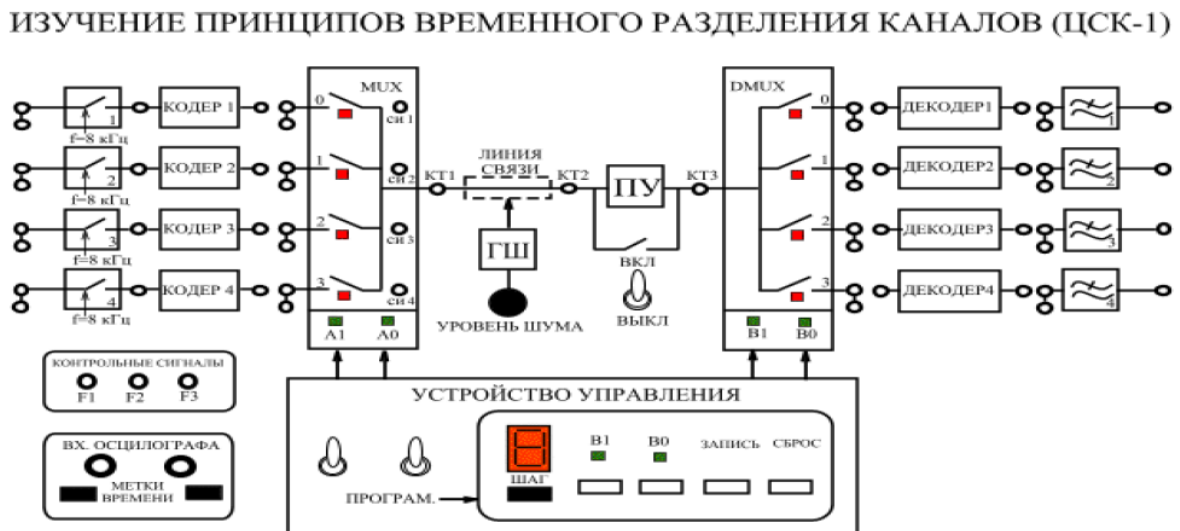


Рисунок 3 – Установка «Изучение принципов временного разделения каналов (ЦСК-1)»

На лицевой панели установки размещены:

- структурная схема четырехканальной линии связи с временным разделением каналов;
- субпанель «КОНТРОЛЬНЫЕ СИГНАЛЫ»;
- субпанель «ВХ. ОСЦИЛОГРАФА»;
- субпанель «УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ».

Установка включается в сеть клавишей «ВКЛ-СЕТЬ» расположенной в правом нижнем углу макета.

На структурной схеме выделены передающая часть, линия связи и приемная часть. Передающая часть состоит из четырех ключей, четырех кодеров каналов и мультиплексора MUX. К линии связи может подключаться генератор шума ГШ. Уровень выходного сигнала этого генератора регулируется ручкой «УРОВЕНЬ ШУМА». Кроме того, в линию связи включается соответствующим тумблером пороговое устройство УР. На приемной стороне имеются демультиплексор DMUX, декодеры и фильтры каналов. На схеме выделены контрольные гнезда для подключения осциллоскопа и производства необходимых соединений.

С гнезд субпанели «КОНТРОЛЬНЫЕ СИГНАЛЫ» снимаются три

различных по форме сигнала, которые после амплитудно-импульсной модуляции (АИМ) или импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) подаются в общую линию связи.

На субпанели «ВХ. ОСЦИЛЛОГРАФА» размещены кнопки управления временными метками и байонетные гнезда I и II для подачи этих меток на входы осциллоскопа.

Субпанель «УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ» содержит кнопки управления и индикаторы. На ней имеются тумблер «32 Гц» - «2 Гц» для выбора одной из двух частот следования импульсов, управляющих мультиплексором и демультиплексором.

При переключении тумблера в положение «2 Гц» индикаторы приборов MUX и DMUX светившиеся ранее непрерывно, начинают периодически переключаться, указывая, какой из каналов включен для каждого интервала времени. При этом индикаторы A0, A1, и B0, B1 указывают двоичный код номера включенного канала.

Устройство управления мультиплексорами может быть в циклическом режиме или режиме программного управления. Выбор режима производится тумблером «ЦИКЛ»-«ПРОГРАМ.». В циклическом режиме входы мультиплексора и демультиплексора переключаются синхронно и синфазно, в естественном порядке. При этом в любой момент времени оказываются связанными друг с другом каналы передающей и приемной части установки с одинаковыми номерами.

В режиме программного управления можно изменить порядок коммутации ключей мультиплексора и демультиплексора. Тогда, например, в один и то же момент времени сигнал с первого хода мультиплексора будет попадать на четвертый выход демультиплексора и т.п.

Для изменения порядка коммутации необходимо перевести тумблер «ЦИКЛ»-«ПРОГРАМ.» в положение «ПРОГРАМ.» и ввести в оперативную память устройства управления номера входов и выходов, которые необходимо соединять одновременно. Это делается кнопками «ШАГ», «ВО» и «В1». Результат настройки высвечивается на расположенных около этих кнопок индикаторах. При этом индикаторы «ВО» и «В1» указывают в двоичном коде номер канала мультиплексора, который установлен на шаге программирования, указанном индикатором «ШАГ».

Установка устройства управления в исходный режим производится кнопкой «СБРОС».

При формировании АИМ-сигнала его дискретизация производится электронными каналами. Частота дискретизации f_0 равна 8 кГц, т.е. период дискретизации T_0 равен 125 мкс.

Могут быть образованы четыре канала связи, на входы которых подаются контрольные сигналы $F1(t)$, $F2(t)$ и $F3(t)$. Один из каналов остается свободным. Поскольку длительность стробирующих импульсов $\tau_0 < T_0$, оставшийся временной интервал между соседними отсчетами используется для размещения АИМ сигналов, соответствующих остальным каналам.

Объединение дискретных сигналов с АИМ, соответствующих этим каналам, осуществляется мультиплексором. Его основу составляют четыре электронных ключа, которые управляются последовательностями стробирующих импульсов $S1i - S4i$. На их входы поступают аналоговые сигналы $F1(t)$, $F2(t)$ и $F3(t)$, а на выходах формируются последовательности отсчетов $F1i$, $F2i$ и $F3i$. Стробирующие импульсы, поступающие на ключи соседних каналов, сдвинуты на временной интервал соответствующий τ_0 . В результате отсчеты отдельных каналов выстраиваются друг за другом и таким образом формируется групповой сигнал на выходе мультиплексора. Он поступает в линию связи и, пройдя по ней, попадает на вход демультиплексора DMUX, в котором производится разделение дискретных сигналов.

Оба устройства – мультиплексор и демультиплексор – управляются синхронно. Для этого в устройстве управления вырабатывается последовательность импульсов с частотой следования 32 кГц, которая поступает на эти элементы. Для визуального контроля осуществляющихся в лабораторной установке коммутаций эта частота может быть уменьшена до 2 Гц. Выбор ее значения осуществляется тумблером «32 кГц – 2 Гц» на лицевой панели установки.

На последнем этапе происходит восстановление аналогового сигнала – формирование исходной функции времени $F(t)$ по пришедшим по линии связи отсчетным импульсам. На практике для выполнения этих операций используется фильтр нижних частот (ФНЧ). Процесс восстановления сигналов целиком основан на выводах теоремы Котельникова.

В лабораторной установке предусмотрен узел, формирующий три различных по форме испытательных сигнала ($F1$, $F2$, $F3$). При проведении исследований они подаются на входы любых трех каналов связи. Вход одного из каналов остается свободным.

Все необходимые соединения между блоками выполняются с помощью соединительных шнуров и клемм, выведенных на лицевую панель.

Анализ осциллограмм на выходах отдельных блоков системы связи, смоделированной в данной лабораторной установке, производится с помощью двухлучевого осциллоскопа. Для удобства проведения измерений его входы подключаются к двум коаксиальным разъемам типа BNC на лицевой панели («ВХ.ОСЦИЛЛОГРАФА» I, II). Предусмотрено также формирование сигнала синхронизации для используемого осциллографа.

3 Задание на практическую работу

1. Установить начальное положение органов управления осциллоскопом. Переключатель уровня чувствительности «V/ДЕЛ» установить в положение «0,05» или «0,1». Ручку переключателя «ВРЕМЯ/ДЕЛ» поставить в положение «5 мс». Подключить кабели входы осциллоскопа к разъемам «ВХ. ОСЦИЛЛОГРАФА» на лицевой панели установки.

2. Подготовить лабораторную установку к проведению измерений. Для этого:

2.1. Включить осциллоскоп. Включить питание лабораторной установки клавишей «ВКЛ-СЕТЬ». При этом непрерывно начинают светиться клавиша «ВКЛ-СЕТЬ» и световые индикаторы установки.

2.2. Установить тумблеры на устройстве управления в положение «32 КГц» и «ЦИКЛ». Подключить входы осциллоскопа к гнезду I субпанели «ВХ. ОСЦИЛЛОГРАФА».

2.3. Нажать кратковременно кнопку «СБРОС» на устройстве управления.

2.4. Установить тумблер порогового устройства УР в линии связи в положение «ВЫКЛ».

2.5. Установить потенциометр «УРОВЕНЬ ШУМА» в линии связи в крайнее положение против часовой стрелки.

3. Провести измерение двух интервалов между метками времени, которые используются в данном лабораторном макете. Результаты измерения будут использоваться в трех лабораторных работах. Для этого выполнить следующие операции:

3.1. Включить метки времени, нажав правую кнопку, находящуюся на субпанели «ВХ. ОСЦИЛЛОГРАФА». Проверить, что при этом левая кнопка находится в отжатом состоянии.

3.2. Добиться устойчивого изображения меток на экране осциллоскопа, подобрав период развертки так, чтобы на экране укладывалось не более двух меток.

3.3. Произвести измерение временного интервала между двумя соседними метками по шкале на экране осциллоскопа, учитывая цену деления, соответствующую положению переключателя «РАЗВЕРТКА-ВРЕМЯ/ ДЕЛ.» на его лицевой панели. Записать измеренное значение в протокол отчета.

3.4. Установить правую кнопку в отжатое состояние и нажать левую. При этом формируются метки с другим временным интервалом.

3.5. Аналогичным образом произвести измерение нового временного интервала, подобрав период развертки так, чтобы и в этом случае на его экране укладывалось бы две метки. Записать измеренное значение в протокол отчета.

3.6. Выключить метки времени, установив обе кнопки на субпанели «ВХ. ОСЦИЛЛОГРАФА» в отжатое состояние. Отключить входы осциллоскопов от разъемов на лицевой панели.

4. Сформировать дискретные сигналы с амплитудно-импульсной модуляцией. Для этого выполнить следующие операции.

4.1. С помощью соединительного кабеля с двумя штекерами подключить гнездо контрольного сигнала F1 к гнезду 0 мультиплексора. Ко второму гнезду 0 подключить потенциальный штекер канала I осциллоскопа. «Земляной» штекер кабеля осциллоскопа подключить к любому из четырех гнезд входа кодеров или, с помощью зажима «крокодил», к внешнему

цилиндру одного из двух разъемов типа BNC на субпанели «ВХ. ОСЦИЛЛОГРАФА». Проконтролировать появление осциллограммы контрольного сигнала.

4.2. Подобрать период развертки так, чтобы на экране укладывался приблизительно один период контрольного сигнала. (Во всех последующих измерениях, выполняемых в данной лабораторной работе, положение переключателя, определяющего период развертки, не изменять).

4.3. Зарисовать осциллограмму контрольного аналогового сигнала. Пользуясь шкалой на экране осциллоскопа и учитывая цену деления, соответствующую положению переключателя «РАЗВЕРТКА-ВРЕМЯ/ДЕЛ.» на лицевой панели, определить временной период контрольного сигнала.

4.4. Подключить второй канал осциллоскопа к выходу мультиплексора (потенциальный штекер к контрольной точке КТ1, а «земляной» к выходу любого кодера). Проконтролировать появление на его экране сигнала с амплитудно-импульсной модуляцией. В данном случае она осуществляется электронными ключами, входящими в состав мультиплексора.

4.5. Включить метки, выбрав временной интервал между ними так, чтобы он соответствовал периоду следования отсчетных импульсов (периоду дискретизации). Для этого нажать соответствующую кнопку на субпанели «ВХ. ОСЦИЛЛОГРАФА» установки. Определить период дискретизации, измерив временной интервал между соседними отсчетами. Занести измеренное значение в протокол отчета.

4.6. Включить метки, выбрав временной интервал между ними так, чтобы он соответствовал длительности отсчетного импульса, нажав соответствующую кнопку на лицевой панели установки. Определить длительность отсчетного импульса. Занести измеренное значение в протокол отчета. Для всех измерений, выполняемых в пункте 4, использовать метки с данным интервалом.

4.7. Зарисовать осциллограмму сигнала с амплитудно-импульсной модуляцией, поступающего на вход второго канала осциллографа. Расположить ее под осциллограммой контрольного сигнала, сохранив масштаб по временной оси и метки.

4.8. Снять соединение гнездо F1 - гнездо 0 мультиплексора.

4.9. Подключить гнездо контрольного сигнала F2 и вход канала I осциллоскопа ко входу 1 мультиплексора подобно тому, как это делалось в п. 4.1. Вход канала II для всех измерений, выполняемых в этом пункте остается подключенным к контрольной точке КТ1.

4.10. Зарисовать осциллограммы сигналов, поступающих на оба входа осциллоскопа (контрольный сигнал F2 и соответствующий АИМ сигнал). Во всех случаях выдерживать одинаковый масштаб по временной (горизонтальной) оси и сохранить на них временные отметки. При зарисовке осциллограмм следует располагать их друг под другом так, чтобы на них были сохранены все временные соотношения между сигналами.

4.11. Снять соединение «гнездо F2 – гнездо 1 мультиплексора». Повторить измерения, соответствующие пункту 4.10, подав контрольный

сигнал F3 на вход 2 мультиплексора.

5. Исследовать процесс формирования группового сигнала. Для этого выполнить следующие операции.

5.1. Подключать контрольный сигнал F1 и вход I канала осциллоскопа ко входу 0 мультиплексора (вход первого канала связи), как это делалось в п.4.1. Вход II канала остается подключенным к контрольной точке КТ1 (к выходу мультиплексора). Проконтролировать появление соответствующих осциллограмм на экране осциллоскопа.

5.2. Не снимая установленного соединения, подключать контрольный сигнал F2 и вход I канала осциллоскопа ко входу 1 мультиплексора, как это делалось в п. 4.9. Проконтролировать по осциллограмме появление на выходе мультиплексора отсчетных импульсов АИМ сигнала, соответствующего второму каналу связи, которые занимают временные интервалы в промежутке между двумя от-счетными импульсами, соответствующими первому каналу (вход 0 мультиплексора).

5.3. Не снимая установленного соединения, подключать контрольный сигнал F3 и вход I канала осциллографа ко входу 2 мультиплексора и выполнить операции, соответствующие пункту 5.2. Осциллограммы на выходе мультиплексора при выполнении последовательных подключений контрольных сигналов к его входам иллюстрируют процесс формирования группового сигнала, который передается по линии связи.

5.4. Выполнив все три коммутации (последний вход мультиплексора при этом остается свободным), зарисовать осциллограмму группового сигнала, наблюдаемую на выходе мультиплексора. Её следует разместить под предыдущими, сохранив выбранный временной масштаб и метки.

6. Проконтролировать процесс разделения каналов с амплитудно-импульсной модуляцией. Для этого подключить потенциальный штекер первого входа осциллоскопа к клемме КТ3 (ко входу демультиплексора), а потенциальный штекер второго входа - последовательно к его выходам 0, 1, 2, 3. При этом осциллограмма, наблюдаемая по первому каналу осциллоскопа соответствует групповому сигналу, а по второму – АИМ сигналу соответствующего ка-нала.

7. Оценить качество восстановления аналогового сигнала. Для этого выполнить следующие операции.

7.1. Подключить выходы 0, 1, 2, 3 демультиплексора к соответствующим входам фильтров нижних частот.

7.2. Для контроля временных соотношений подключить вход I осциллографа ко входу 0 мультиплексора. При этом на экране наблюдается исходный аналоговый сигнал первого канала.

7.3. Подключить вход I осциллоскопа ко входу 0 мультиплексора, а вход II - к выходу ФНЧ1. При этом наблюдаются исходный и восстановленный аналоговые сигналы.

7.4. Зарисовать осциллограмму восстановленного сигнала, сохранив все временные соотношения, масштаб и временные метки. Отметить на ней временную задержку восстановленного сигнала относительно исходного.

7.5. Аналогичным образом, подключая входы I, II осциллоскопа ко входу и выходу второго и третьего каналов, зарисовать осциллограммы соответствующих восстановленных сигналов.

7.6. Сравнить по форме исходные сигналы и сигналы на выходах фильтров.

4 Контрольные вопросы

1. Какие сигналы называют дискретными?
2. Как производится дискретизация сигналов?
3. Из каких соображений выбирают частоту дискретизации?
4. Какой принята частота дискретизации для речевых сигналов в телефонии?
5. Что такое амплитудно-импульсная модуляция (АИМ)?
6. Как получить сигнал с АИМ из аналогового сигнала?
7. Как правильно объединить несколько сигналов с АИМ в одном частотном канале?
8. Из каких соображений выбирают частоту следования импульсов, управляющих мультиплексором?
9. Как правильно разделить несколько сигналов с АИМ, следующих по одному частотному каналу?
10. Как производится восстановление аналогового сигнала из сигнала с АИМ?
11. Каковы требования к характеристикам и параметрам фильтров, восстанавливающих аналоговый сигнал?
12. Зачем нужны в лабораторной установке контрольные сигналы? Как они обрабатываются?
13. Каково назначение и функции субпанели «ВХ. ОСЦИЛЛОГРАФА»?
14. В какое положение нужно установить тумблеры на субпанели «УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ» перед началом выполнения работы?
15. Зачем нужна кнопка «СБРОС»?
16. Как получить на экране осциллоскопа метки времени, вырабатываемые лабораторной установкой? Зачем они нужны при проведении эксперимента?
17. Как определить с помощью осциллоскопа период и частоту дискретизации сигналов?
18. Какова связь между сигналом на входе мультиплексора и сигналами с АИМ на его входах?
19. Каковы причины различия по форме исходного аналогового сигнала и сигнала, восстановленного из сигнала с АИМ?
20. Как повысить точность восстановления аналоговых сигналов из сигналов с АИМ?

Библиографический список

1. Основы многоканальных систем передачи: методические указания по выполнению лабораторных работ для студентов специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост. А.Е. Севрюков, Д.С. Коптев. – Курск, 2020. – 72 с.

2. Помехоустойчивость устройств приёма сигналов в цифровых системах связи / В. Г. Довбня, Д. С. Коптев, В. Г. Андронов, А. А. Чув. – Курск : Юго-Западный государственный университет, 2025. – 239 с.

Практическая работа №3. Формирование кодов в цифровых линейных трактах

1 Цель работы

Изучение принципов построения линейных трактов цифровых систем передачи (ЦСП), исследование алгоритмов формирования линейных сигналов, а также приобретение практических навыков расчета параметров и временного представления различных линейных кодов для заданной цифровой последовательности.

2 Краткие теоретические сведения

Любая цифровая система передачи (ЦСП) содержит оборудование окончания (ОС) и оборудование линейного тракта. Линейный тракт предназначен для передачи цифрового сигнала по направляющей системе (электрический кабель или оптическое волокно) с минимальными искажениями и заданной достоверностью.

Структурная схема линейного тракта представлена на рисунке 1.

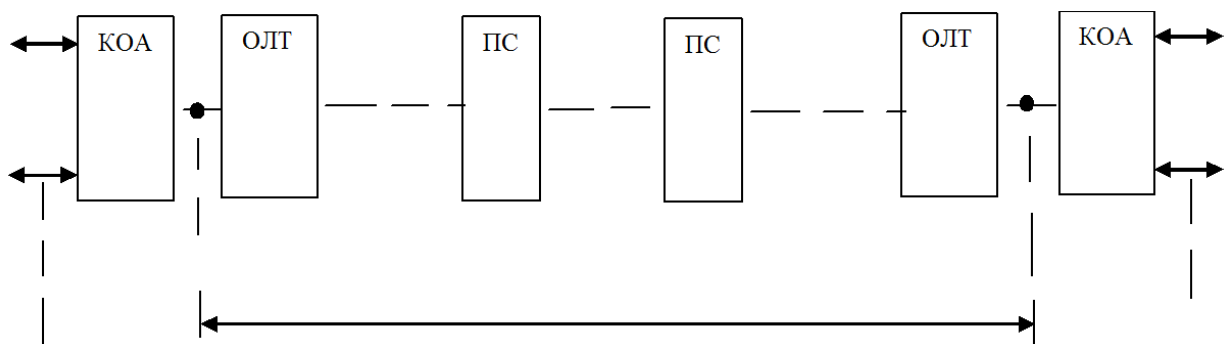


Рисунок 1 - Линейный тракт

Обозначения на схеме:

– КОА – каналообразующая аппаратура. Служит для образования каналов связи (формирует первичный цифровой поток).

– ОЛТ – оборудование окончания линейного тракта. Выполняет преобразование сигнала с выхода КОА в вид, обеспечивающий качественную

передачу по направляющей системе, и обратное преобразование на приеме.

– Направляющая система (НС) – среда распространения сигнала (электрический кабель или оптическое волокно).

– ПС/НРП – промежуточные станции (необслуживаемые регенерационные пункты), предназначенные для компенсации затухания и восстановления формы сигнала.

Основными устройствами линейного тракта являются преобразователи кода и регенераторы (рисунок 2).

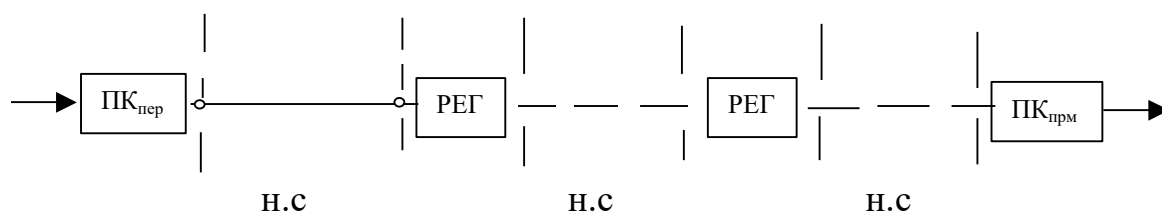


Рисунок 2 – Устройства линейного тракта

Преобразователь кода передачи преобразует бинарный сигнал (ЦС) в цифровой линейный сигнал (ЦЛС).

Регенератор – восстанавливает первоначальную форму и длительность сигнала, усиливает сигнал, корректирует амплитудно-частотные искажения, определяет значение каждого бита, формирует импульсы прямоугольной формы).

В процессе передачи по линейному тракту сигнал подвергается воздействию различных дестабилизирующих факторов:

1. Затухание сигнала – уменьшение амплитуды за счет потерь энергии в направляющей системе.

2. Частотные искажения – неравномерность АЧХ линии приводит к изменению формы импульсов (например, затягивание фронтов).

3. Межсимвольная интерференция (МСИ) – перекрытие соседних импульсов во времени из-за ограниченной полосы пропускания тракта и дисперсии.

4. Внешние помехи – электромагнитные наводки от соседних цепей (переходные влияния) или внешних источников.

5. Собственные шумы – тепловые шумы усилительных элементов и дробовые шумы фотоприемников (в оптических трактах).

6. Дисперсия – в оптических линиях уширение импульсов из-за различия скоростей распространения спектральных или модовых компонент сигнала.

Для минимизации этих искажений и обеспечения высокой помехоустойчивости применяются специальные линейные коды и регенераторы.

К линейным кодам предъявляются следующие требования:

- процесс кодирования не должен зависеть от источника информации;
- контроль качества
- возможность передачи любой информационной последовательности

СИМВОЛОВ;

- возможность постоянного контроля качества связи;
- возможность выделения хронизирующего сигнала для синхронизации и фазирования работы приемников сигнала;
- исключение и подавление НЧ и ВЧ- составляющих энергетического спектра
- эффективное использование мощности передающего устройства.

Основные характеристики линейных кодов:

- избыточность
- диспаратетность
- значность кода n ,
- основание кода m ,
- число информационных символов k ,
- объем кода N ($N=m^n$).

Преобразователь кода информационную последовательность (kB) кодирует в сигналы линейного кода вида « nm », причем вместо численной величины записывается первая буква основания кода.

Таблица 1 – Основание и обозначение кода

основание	2	3	4	5	6
обозначение	B	T	Q	QI	S
наименование	Binary	Ternary	Quaternary	Qunary	Sexternary

Избыточность кода определяется по формуле:

$$R = ((H_{\max} - H) / H_{\max}) \leq 1,$$

где H - энтропия источника, равная $H = \log_2 N$, если все сигналы равновероятны и объем кода N .

Для линейного кода $N_{\max} = m^n$; если $m=2$, то $N=2^k$.

Избыточность линейного кода ЦСП определяется по формуле:

$$R = (\log_2 m^n - \log_2 2^k) / \log_2 m^n = 1 - (k/n \cdot \log_2 m)$$

3 Задание на практическую работу

1. Нарисовать структурную схему линейного тракта ЦСП. Пояснить назначение элементов схемы. Указать основные причины возникновения искажений и помех в линейном тракте.

2. Перечислите требования к линейным сигналам и линейным кодам ЦСП. В соответствии с заданием (таблица 1) поясните алгоритм формирования линейного кода на примере заданной цифровой последовательности.

3. Произведите расчет параметров заданного линейного кода.

Таблица 1 – Исходные данные цифровой последовательности к заданию

№ вар	Цифровая последовательность	№ вар	Цифровая последовательность	№ вар	Цифровая последовательность
1	11000011100001000011	11	1101001101001000011	21	01010011101001000011
2	11011011100001000011	12	01000010100001100011	22	11000010100001100011
3	01100011100001001011	13	01110011000011000011	23	11110011100001100011
4	00110011100001000011	14	11010001100001001111	24	01010001100001001111
5	1100001111101000011	15	11010010100001001011	25	11110010100001001011
6	11110001100001000011	16	1001001111011101111		
7	11000011100001111011	17	11110011100001000011		
8	1100011010000110011	18	01010011000000000111		
9	1101001110000100111	19	1101101101101101111		
10	10101011100001001011	20	1101001111111001111		

Таблица 2 – Исходные данные кода к заданию

№ вар	Наименование кода	№ вар	Наименование кода	№ вар	Наименование кода
1	Двуполярный двоичный код (БВН, NRZ)	11	Код с инверсией импульсов нажатия (СМИ)	21	Блочный код 5B6B
2	Биполярный троичный код (ЧПИ, AMI)	12	Относительный биимпульсный код (ОБК)	22	Троичный код 4B3T
3	Модифицированный код ЧПИ, HDB-3	13	Блочный код 5B6B	23	Четверичный код 2B1Q
4	Код с инверсией импульсов нажатия (СМИ)	14	Троичный код 4B3T	24	Четверичный 9B6Q
5	Относительный биимпульсный код (ОБК)	15	Троичный код 4B3T	25	Троичный 3B2T
6	Блочный код 5B6B	16	Четверичный код 2B1Q		
7	Троичный код 4B3T	17	Четверичный 9B6Q		
8	Четверичный код 2B1Q	18	Троичный 3B2T		
9	Четверичный 9B6Q	19	Двуполярный двоичный код (БВН, NRZ)		
10	Троичный 3B2T	20	Биполярный троичный код (ЧПИ, AMI)		

Пользуясь алгоритмом формирования заданного кода, нарисуйте временные диаграммы бинарного (цифрового) сигнала и линейного сигнала.

4 Контрольные вопросы

1. Дайте определение линейного тракта цифровой системы передачи (ЦСП). Перечислите его основные элементы (КОА, ОЛТ, НРП) и поясните их функции.

2. Что такое регенератор? Какие функции он выполняет в процессе восстановления цифрового сигнала? Чем регенератор отличается от простого усилителя?

3. Перечислите основные причины возникновения искажений и помех в линейном тракте. Поясните суть межсимвольной интерференции.

4. Почему исходный двоичный сигнал (NRZ) нельзя напрямую передавать в линию? Какие проблемы возникают при его непосредственной передаче?

5. Сформулируйте основные требования, предъявляемые к линейным сигналам. Почему важно, чтобы в спектре сигнала была составляющая тактовой частоты или возможность её выделения?

6. Почему наличие постоянной составляющей в линейном сигнале нежелательно? К каким последствиям это приводит?

7. По каким признакам классифицируют линейные коды?

8. Что такое избыточность линейного кода?

9. Что такое диспаратность кода?

Библиографический список

1. Расчет параметров линейных трактов аналоговых и цифровых систем передачи: методические указания по выполнению курсовой работы / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.Е. Севрюков, Д.С. Коптев. - Курск, 2020. – 19 с.: табл. 6. – Библиогр.: с. 15.

2. Помехоустойчивость устройств приёма сигналов в цифровых системах связи / В. Г. Довбня, Д. С. Коптев, В. Г. Андронов, А. А. Чув. – Курск : Юго-Западный государственный университет, 2025. – 239 с.

Практическая работа №4. Регенерация сигналов в цифровых линейных трактах

1 Цель работы

Изучение принципов регенерации цифровых сигналов в линиях связи различных типов (коаксиальные кабели, симметричные кабели, волоконно-оптические линии), исследование факторов, ограничивающих длину регенерационного участка, а также приобретение практических навыков расчета длины регенерационного участка по допустимой защищенности от помех, по затуханию и по дисперсии.

2 Краткие теоретические сведения

Для увеличения дальности действия ЦСП линия передачи разбивается на участки, между которыми устанавливаются необслуживаемые или обслуживаемые регенерационные пункты. Регенерационное оборудование, размещенное на этих пунктах, обеспечивает восстановление формы

передаваемых импульсных сигналов.

Регенерационным участком называют участок кабельной сети с примыкающим к нему регенераторным оборудованием. В связи с действием помех и влиянием затухания сигнала в линии длина регенерационного участка является ограниченной.

1) Расчет длины регенерационного участка. Расчет для магистралей с коаксиальным кабелем

Расчет выполняют по эквивалентной схеме регенератора (рисунок 1), в которой к идеальной линии и усилителю (УС) добавлен генератор шума (ГШ).

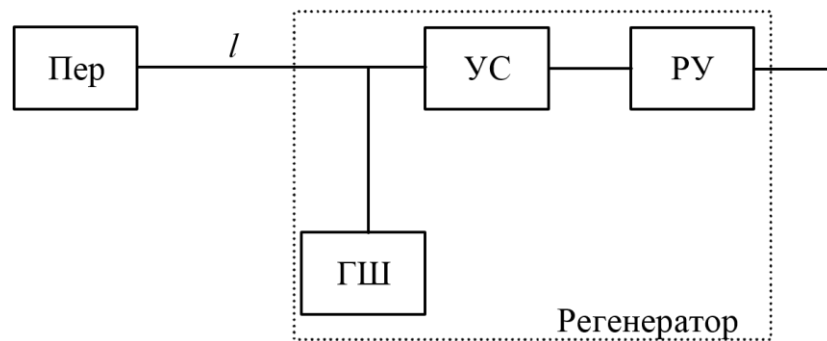


Рисунок 1 – Эквивалентная схема регенератора

При данном типе кабеля источниками помех являются:

1. Тепловой шум линии $P_{\text{тш}} = kT\Delta f$, где $k = 1,28 \cdot 10^{-23}$ Дж/град – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура по Кельвину, $\Delta f = (0 - 0,5f_{\text{т}})$, т.е. $\Delta f = 0,5f_{\text{т}}$ – рабочий диапазон частот линейного тракта.

2. Собственные шумы усилителя $P_{\text{сш}} = P_{\text{тш}}D_{\text{ш}}$, где $D_{\text{ш}}$ – коэффициент шума усилителя.

Мощность теплового шума при нормальной температуре ($T = 293\text{K}$) можно определить как $p_{\text{тш}} = 10\lg(P_{\text{тш}}/1\text{мВт}) = -173,95 + 10\lg(0,5f_{\text{т}})$.

Уровень теплового шума, развиваемый генератором шума, определяется как

$$p_{\text{гш}} = p_{\text{тш}} + 10\lg(0,5f_{\text{т}}/1\text{МГц}) + 10\lg D_{\text{ш}},$$

где $D_{\text{ш}}$ – коэффициент шума усилителя.

Т.к. наиболее мощные компоненты спектра сигналов расположены в области частоты $0,5f_{\text{т}}$, то мощность сигнала на входе регенератора оценивают как $p_{\text{пр}} = p_{\text{пер}} - \alpha(0,5f_{\text{т}})l$, где $\alpha(f)$ – километрическое затухание кабеля, l – длина регенерационного участка.

Защищенность сигналов от помех регенератора

$$A = p_{\text{пр}} - p_{\text{гш}} = p_{\text{пер}} - p_{\text{тш}} - 10\lg(0,5f_{\text{т}}/1\text{МГц}) - 10\lg D_{\text{ш}} - \alpha(0,5f_{\text{т}})l.$$

Километрическое затухание кабеля зависит от типа кабеля:

для коаксиального кабеля 1,2/4,6 мм: $\alpha(f) = 0,07 + 5,26\sqrt{f} + 0,015f$,

для коаксиального кабеля 2,6/9,4 мм: $\alpha(f) = 0,014 + 2,46\sqrt{f} + 0,006f$,

где f – частота, МГц.

Для оценки допустимого значения защищённости, при котором обеспечивается заданная вероятность ошибки, можно воспользоваться следующим приближенным выражением:

$$A_{\text{доп}} = 5,23 + 11 \cdot \lg \lg P_{\text{ош1}}^{-1} + 20 \lg(m-1) + A_3,$$

где $P_{\text{ош1}}$ – вероятность ошибки одного регенератора; m – количество уровней линейного кода (для кодов АМІ и НДВ-3 $m=3$, для СМІ $m=2$); A_3 – запас помехоустойчивости регенератора, учитывающий неидеальность его узлов (обычно составляет 5–10 дБ).

Длину регенерационного участка определяют при условии $A_{\text{доп}} = A$:

$$l = \frac{p_{\text{пер}} - p_{\text{тш}} - 10 \lg(0,5 f_T / 1 \text{ МГц}) - 10 \lg D_{\text{ш}} - 11 \lg P_{\text{ош}}^{-1} - 20 \lg(m-1) - A_3}{\alpha(0,5 f_T)}$$

2) Расчет для магистралей с симметричным кабелем

В симметричных кабелях основным видом помех являются переходные влияния между сигналами, передаваемыми по различным парам проводников, размещенных в одном кабеле. Предельная длина участка регенерации для цифровых трактов, организуемых по таким кабелям, определяется из условия обеспечения минимально допустимой величины защищенности от переходных помех. Взаимные влияния между цепями оцениваются величиной переходного затухания на ближнем конце A_0 и дальнем A_l концах участка (рисунок 2):

$$A_0 = 20 \lg(I_1/I_{20}) = 20 \lg(U_1/U_{20}), \quad A_l = 20 \lg(I_1/I_{2l}) = 20 \lg(U_1/U_{2l}),$$

где I_1, U_1 – ток и напряжение на входе влияющей цепи; I_{20}, U_{20} – ток и напряжение на ближнем конце подверженной влиянию цепи; I_{2l}, U_{2l} – ток и напряжение на дальнем конце подверженной влиянию цепи.

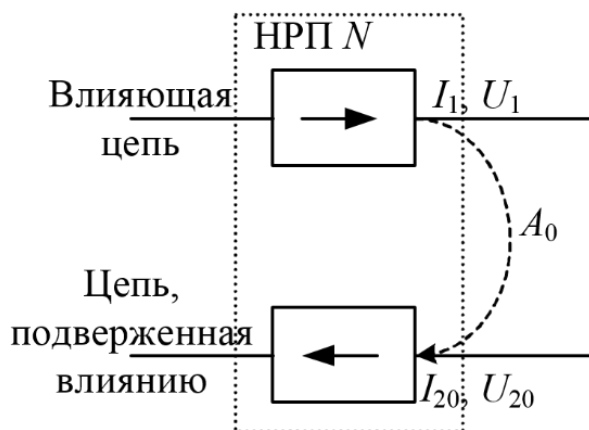


Рисунок 2 – Переходное затухание в системе с одним кабелем

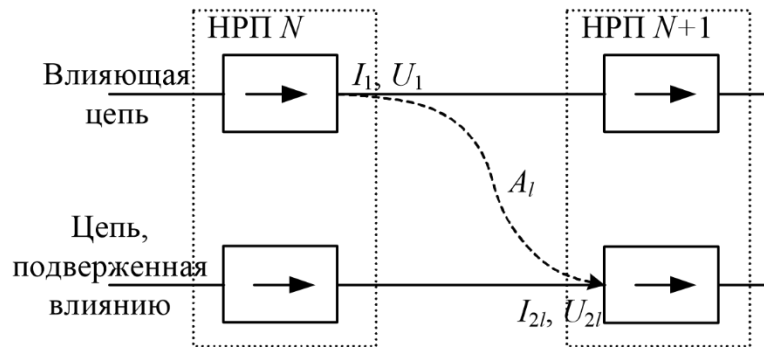


Рисунок 3 – Переходное затухание в системе с двумя кабелями

Величина переходного влияния в симметричных кабелях зависит от длины участка и частоты передаваемого сигнала.

Если все регенераторы ЦСП работают по одному кабелю, то наиболее опасное влияние оказывает передача одного регенератора на прием другого (рисунок 2). В этом случае уровень переходных помех для участка, состоящего из N регенераторов, определяется как $p_{п0} = p_{пер} - A_0 + 10\lg N$.

В случае работы ЦСП по двум кабелям, т.е. все регенераторы, работающие на передачу, подсоединены к одному кабелю, а регенераторы, работающие на прием, – к другому, наибольшее влияние будет оказывать переходное затухание на дальнем конце (рисунок 3). В этом случае уровень переходных помех для участка, состоящего из N регенераторов, определяется как

$$p_{пl} = p_{пер} - A_l + 10\lg N.$$

В общем случае, для ближнего и дальнего концов кабеля, защищенность сигналов от помех может быть оценена как:

$$A = p_{пр} - p_{п0,l} = p_{пр} - p_{пер} + A_{0,l} - 10\lg N = A_{0,l} - \alpha(0,5f_T)l - 10\lg N.$$

Аналогично расчету для систем передачи на коаксиальном кабеле длину регенерационного участка определяют с учетом допустимого значения защищенности $A_{доп}$ при условии $A_{доп} = A$:

$$l = \frac{A_{0,l} - 5,23 - 11\lg \lg P_{out1}^{-1} - 20\lg(m-1) - A_3 - 10\lg N}{\alpha(0,5f_T)}$$

3) Расчет волоконно-оптических линий связи

Для определения длины регенерационного участка волоконнооптической линии связи (ВОЛС) составляется его расчётная схема (рисунок 4).

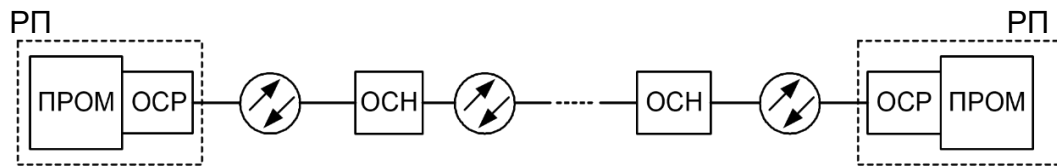


Рисунок 4 – Расчётная схема регенерационного участка ВОЛС

где:

РП – регенерационный пункт;

ПРОМ – приёмопередающий оптический модуль, преобразующий оптический сигнал в электрический, восстанавливающий параметры последнего и преобразующий его в оптический;

ОСР – оптический соединитель разъёмный (их число на РУ равно 2);

ОСН – оптический соединитель неразъёмный, число которых на единицу меньше числа строительных длин ОК, составляющих РУ.

Оконечные устройства (ПРОМ) подключаются к станционным кабелям с использованием разъёмных оптических соединителей (ОСР). Соединение оптических волокон (ОВ) станционных и линейного оптического кабеля (ОК), а также соединение строительных длин последнего выполняется при помощи сварных неразъёмных оптических соединителей (ОСН).

Максимальная длина регенерационного участка ВОЛС ограничивается затуханием и дисперсией импульсных сигналов. Поскольку эти параметры передачи являются независимыми, то при проектировании ВОЛС необходимо отдельно рассчитать длину регенерационного участка по затуханию L_a и длину регенерационного участка по дисперсии L_d . Из полученных значений выбирается наименьшее.

4) Расчет длины регенерационного участка по затуханию

Общее затухание линии без регенераторов составляет:

$$a = 10 \lg(P_{\text{пер}}/P_{\text{пр}}) = p_{\text{пер}} - p_{\text{пр}} = \alpha L + a_{\text{рс}} N_{\text{рс}} + a_{\text{нс}} N_{\text{нс}},$$

где $P_{\text{пер}}$, $p_{\text{пер}}$ – мощность и уровень мощности излучения источника, вводимого в световод (дБ); $P_{\text{пр}}$, $p_{\text{пр}}$ – мощность и уровень мощности принимаемого оптического сигнала (дБ); L – длина линии (км); α – километрическое затухание в оптических волокнах кабеля (дБ/км); $a_{\text{рс}}$, $a_{\text{нс}}$ – потери на разъёмных и неразъёмных соединениях (дБ); $N_{\text{рс}}$, $N_{\text{нс}}$ – число разъёмных и неразъёмных соединителей.

Потери в неразъёмных соединениях нормируются и составляют 0,1 дБ.

Потери в разъёмных соединителях образуются из потерь вследствие радиального смещения на стыке ОВ, потерь на угловое рассогласование и потерь на осевое рассогласование (рис. 5 – 7). Сумма потерь в разъёмных соединителях не должна превышать 0,5 дБ.

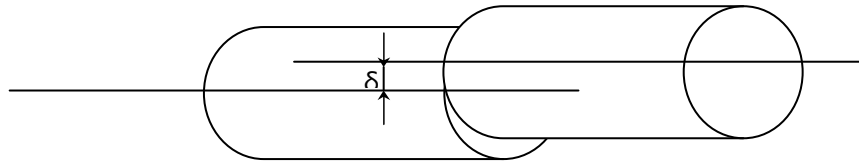


Рисунок 5 – Радиальное смещение ОВ

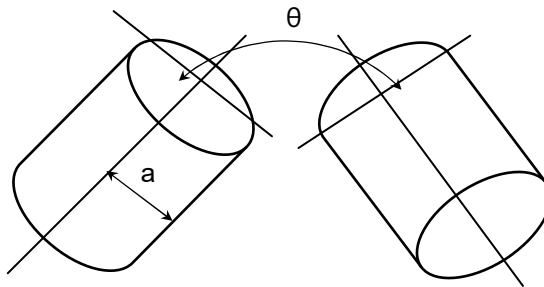


Рисунок 6 – Угловое рассогласование

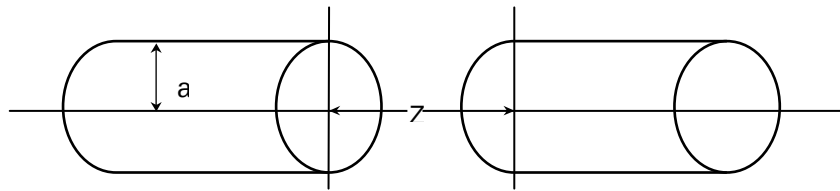


Рисунок 7 – Осевое рассогласование

Если линия без регенераторов, то число разъемных соединителей $N_{рс} = 2$, один – для подключения источника, другой – для подключения приемника оптических сигналов.

Число неразъемных соединителей на длине межстанционной линии определяется по формуле

$$N_{нс} = (L/L_{стр}) - 1,$$

где $L_{стр}$ – строительная длина кабеля (длина кабеля в бухте).

Максимальная длина ВОЛС без регенераторов при ограничении по затуханию, с учетом выражений для a и $N_{нс}$, определяется из выражения:

$$L_a = \frac{p_{пер} - p_{пр} - \mathcal{E} - a_{рс} N_{рс} + a_{нс}}{\alpha + \frac{a_{нс}}{L_{стр}}}$$

где $\mathcal{E}$ – энергетический запас системы передачи, необходимый для компенсации отклонений параметров линии в процессе эксплуатации (дБ), для районов Урала $\mathcal{E} = 6$.

В простейшем случае, когда оптическим кабелем соединены передатчик и приемник, количество ОСР равно 2. Включение каждого

дополнительного устройства в линейный тракт (оптического кросса, оптического усилителя, компенсатора дисперсии и т.п.) осуществляется при помощи двух ОСР.

Длина регенерационной секции может быть существенно увеличена за счет использования оптических усилителей. В этом случае следует учесть увеличение количества ОСР и вместо $p_{\text{пер}} - p_{\text{пр}}$ использовать

$$A' = p_{\text{пер}} - p_{\text{пр}} + K_{\text{м}} + K_{\text{п}} + \sum K_{\text{л}},$$

где $K_{\text{м}}$ – коэффициент усиления усилителя мощности; $K_{\text{п}}$ – коэффициент усиления предварительного усилителя; $K_{\text{л}}$ – коэффициент усиления линейного усилителя.

5) Расчет длины регенерационного участка по дисперсии

Ограничения, вызванные дисперсией, стали основным фактором, определяющим расстояние регенерационных участков во многих системах.

Дисперсия (τ) – это рассеяние во времени спектральных или модовых составляющих оптического сигнала. Дисперсия приводит к увеличению длительности импульса при прохождении по оптическому волокну. Сигнал на приёме приходит размытым, искажённым, с увеличением длины линии искажения увеличиваются. Уширение импульса определяется как квадратичная разность длительности импульсов на входе и выходе оптического волокна.

$$\tau = \sqrt{t_{\text{вых}}^2 - t_{\text{вх}}^2},$$

где $t_{\text{вх}}^2$ – длительность импульса на входе; $t_{\text{вых}}^2$ – длительность импульса на выходе.

Значения $t_{\text{вх}}^2$ и $t_{\text{вых}}^2$ берутся на уровне половины амплитуды импульса.

В одномодовых оптических волокнах при условии изотропности распространяется одна мода. По этой причине отсутствует модовая дисперсия. И причиной уширения импульсов является хроматическая дисперсия, которая, в свою очередь, делится на материальную дисперсию и волноводную (внутримодовую) дисперсию.

Хроматическую дисперсию можно определить как сумму материальной и волноводной дисперсий.

$$\tau = \tau_{\text{мат}} + \tau_{\text{вв}},$$

где $\tau_{\text{мат}}$ – материальная дисперсия; $\tau_{\text{вв}}$ – волноводная дисперсия.

Для оценки величины максимальной длины регенерационного участка, ограниченного дисперсионными искажениями, может быть использовано следующее выражение:

$$L_d = \frac{4,4 \cdot 10^5}{\tau \cdot \Delta\lambda \cdot B}$$

где τ (пс/(нм*км)) – суммарная дисперсия одномодового оптического волокна в выбранном оптическом кабеле; $\Delta\lambda$ (нм) – ширина спектра

оптического излучения выбранной системы передачи; B (МГц) – скорость передачи цифровых сигналов по оптическому тракту для выбранной системы передачи.

Если по результатам расчетов длина регенерационной секции меньше длины ВОЛС, то на таких ВОЛС должны быть использованы регенераторы либо ОК и аппаратура с другими параметрами. Критерием окончательного выбора должно быть выполнение соотношения $L_d > L_a$ с учетом требуемой пропускной способности линии и возможностью ее увеличения в будущем без значительных капитальных затрат.

3 Задание на практическую работу

Задание №1

Провести расчет кабельной системы передачи ИКМ-480 (Е3) с параметрами ($T = 293\text{K}$):

Вариант	Параметры						Коэффициент шума усилителя $D_{ш}$ дБ.
	Уровень сигнала на выходе регенератора $p_{пер}$ дБ	Тактовая частота f_T МГц.	Вероятность ошибки одного регенератора для данного участка сети $P_{ош1}$	Код в линии	Тип кабеля мм	Запас помехоустойчивости регенератора $A_з$ дБ	
1	10,6	32,123	10^{-8}	AMI	1,2/4,6	8,4	6
2	11	34,368	10^{-7}	HDB-3	2,6/9,4	8,5	5
3	9,5	33,345	10^{-6}	СМI	1,2/4,6	9,2	7
4	12,2	35,156	10^{-8}	AMI	2,6/9,4	8,7	4
5	10,8	34,271	10^{-6}	СМI	2,6/9,4	8	7
6	9,7	34,111	10^{-8}	HDB-3	1,2/4,6	9,1	6
7	8,9	34,234	10^{-6}	AMI	1,2/4,6	9	5
8	12	36,123	10^{-7}	СМI	2,6/9,4	9,5	8
9	9	33,876	10^{-6}	HDB-3	2,6/9,4	8,7	3
10	8	33,935	10^{-8}	AMI	2,6/9,4	9,5	4
11	13	33,578	10^{-7}	HDB-3	1,2/4,6	7,6	5
12	10,5	34,965	10^{-6}	AMI	2,6/9,4	7,3	6
13	10	34,987	10^{-8}	СМI	2,6/9,4	7	7
14	12,1	35,116	10^{-6}	СМI	2,6/9,4	7,5	8
15	9,8	35,234	10^{-7}	HDB-3	2,6/9,4	8,2	5
16	10,2	34,725	10^{-8}	AMI	1,2/4,6	8,1	4
17	11,4	34,125	10^{-7}	СМI	2,6/9,4	8,5	6
18	10,5	33,987	10^{-8}	HDB-3	2,6/9,4	8,7	7
19	9,4	33,985	10^{-6}	СМI	1,2/4,6	8,2	6
20	8,7	34,367	10^{-7}	AMI	2,6/9,4	8	5

Задание №2

Провести расчет для магистралей с симметричным кабелем с заданными параметрами:

1. Вариант 1,14 $A_0 = 65$ дБ $\alpha(0,5f_T) = 2.0$ дБ/км $f_T = 2048$ кГц $N = 5$ Адоп = 6 дБ Тип конфигурации: 1 кабель	2.Вариант 6,17 $A_1 = 62$ дБ $\alpha(0,5f_T) = 2.5$ дБ/км $f_T = 512$ кГц $N = 6$ Адоп = 5 дБ Тип конфигурации: 2 кабеля
3. Вариант 2,16 $A_1 = 60$ дБ $\alpha(0,5f_T) = 3.0$ дБ/км $f_T = 4096$ кГц $N = 8$ Адоп = 6 дБ Тип конфигурации: 2 кабеля	4.Вариант 7,20 $A_0 = 75$ дБ $\alpha(0,5f_T) = 1.8$ дБ/км $f_T = 4096$ кГц $N = 15$ Адоп = 7 дБ Тип конфигурации: 1 кабель
5. Вариант 3,15 $A_0 = 70$ дБ $\alpha(0,5f_T) = 1.5$ дБ/км $f_T = 1024$ кГц $N = 10$ Адоп = 6 дБ Тип конфигурации: 1 кабель	6.Вариант 8,18 $A_1 = 58$ дБ $\alpha(0,5f_T) = 4.5$ дБ/км $f_T = 2048$ кГц $N = 7$ Адоп = 4 дБ Тип конфигурации: 2 кабеля
7. Вариант 4,11 $A_1 = 55$ дБ $\alpha(0,5f_T) = 4.0$ дБ/км $f_T = 8192$ кГц $N = 4$ Адоп = 3 дБ Тип конфигурации: 2 кабеля	8.Вариант 9,13 $A_0 = 63$ дБ $\alpha(0,5f_T) = 2.8$ дБ/км $f_T = 2048$ кГц $N = 9$ Адоп = 5 дБ Тип конфигурации: 1 кабель
9. Вариант 5,12 $A_0 = 68$ дБ $\alpha(0,5f_T) = 2.2$ дБ/км $f_T = 2048$ кГц $N = 12$ Адоп = 8 дБ Тип конфигурации: 1 кабель	10. Вариант 10,19 $A_1 = 72$ дБ $\alpha(0,5f_T) = 3.5$ дБ/км $f_T = 4096$ кГц $N = 4$ Адоп = 10 дБ Тип конфигурации: 2 кабеля

Задание №3

Провести расчет длины регенерационной секции по затуханию и расчет длины регенерационной секции по дисперсии по заданным параметрам:

1. Вариант 1,15 $\alpha = 0,22$ дБ/км $\tau = 5$ пс/(нм*км) $B = 15000$ МГц $\Delta\lambda = 0,8$ нм $P_{пер} = 0$ дБм $P_{пр} = -30$ дБм $\Theta = 6$ дБ $\alpha_{нс} = 0,1$ дБ $\alpha_{рс} = 0,5$ дБ $N_{рс} = 2$	2.Вариант 6,17 $\alpha = 0,19$ дБ/км $\tau = 15$ пс/(нм*км) $B = 15000$ МГц $\Delta\lambda = 0,7$ нм $P_{пер} = 2$ дБм $P_{пр} = -30$ дБм $\Theta = 7$ дБ $\alpha_{нс} = 0,1$ дБ $\alpha_{рс} = 0,5$ дБ $N_{рс} = 1$
--	--

3. Вариант 2,18 $\alpha = 0,18$ дБ/км $\tau = 17$ пс/(нм*км) $B = 10000$ МГц $\Delta\lambda = 0,6$ нм $R_{\text{пер}} = 3$ дБм $R_{\text{пр}} = -33$ дБм $\Xi = 7$ дБ $\alpha_{\text{нс}} = 0,1$ дБ $\alpha_{\text{рс}} = 0,5$ дБ $N_{\text{рс}} = 2$	4.Вариант 7,16 $\alpha = 0,3$ дБ/км $\tau = 20$ пс/(нм*км) $B = 10000$ МГц $\Delta\lambda = 1,2$ нм $R_{\text{пер}} = -7$ дБм $R_{\text{пр}} = -28$ дБм $\Xi = 8$ дБ $\alpha_{\text{нс}} = 0,1$ дБ $\alpha_{\text{рс}} = 0,5$ дБ $N_{\text{рс}} = 2$
5. Вариант 3,12 $\alpha = 0,25$ дБ/км $\tau = 18$ пс/(нм*км) $B = 25000$ МГц $\Delta\lambda = 1$ нм $R_{\text{пер}} = -2$ дБм $R_{\text{пр}} = -27$ дБм $\Xi = 10$ дБ $\alpha_{\text{нс}} = 0,1$ дБ $\alpha_{\text{рс}} = 0,5$ дБ $N_{\text{рс}} = 2$	6.Вариант 8,14 $\alpha = 0,21$ дБ/км $\tau = 3$ пс/(нм*км) $B = 25000$ МГц $\Delta\lambda = 0,6$ нм $R_{\text{пер}} = 0$ дБм $R_{\text{пр}} = -31$ дБм $\Xi = 6$ дБ $\alpha_{\text{нс}} = 0,1$ дБ $\alpha_{\text{рс}} = 0,5$ дБ $N_{\text{рс}} = 2$
7. Вариант 4,11 $\alpha = 0,20$ дБ/км $\tau = 4$ пс/(нм*км) $B = 30000$ МГц $\Delta\lambda = 0,5$ нм $R_{\text{пер}} = 1$ дБм $R_{\text{пр}} = -32$ дБм $\Xi = 6$ дБ $\alpha_{\text{нс}} = 0,1$ дБ $\alpha_{\text{рс}} = 0,5$ дБ $N_{\text{рс}} = 2$	8.Вариант 9,20 $\alpha = 0,24$ дБ/км $\tau = 14$ пс/(нм*км) $B = 18000$ МГц $\Delta\lambda = 0,4$ нм $R_{\text{пер}} = -3$ дБм $R_{\text{пр}} = -29$ дБм $\Xi = 9$ дБ $\alpha_{\text{нс}} = 0,1$ дБ $\alpha_{\text{рс}} = 0,5$ дБ $N_{\text{рс}} = 2$
9. Вариант 5,13 $\alpha = 0,23$ дБ/км $\tau = 16$ пс/(нм*км) $B = 20000$ МГц $\Delta\lambda = 0,9$ нм $R_{\text{пер}} = -5$ дБм $R_{\text{пр}} = -35$ дБм $\Xi = 5$ дБ $\alpha_{\text{нс}} = 0,1$ дБ $\alpha_{\text{рс}} = 0,5$ дБ $N_{\text{рс}} = 2$	10. Вариант 10,19 $\alpha = 0,17$ дБ/км $\tau = 2$ пс/(нм*км) $B = 35000$ МГц $\Delta\lambda = 0,3$ нм $R_{\text{пер}} = 4$ дБм $R_{\text{пр}} = -34$ дБм $\Xi = 7$ дБ $\alpha_{\text{нс}} = 0,1$ дБ $\alpha_{\text{рс}} = 0,5$ дБ $N_{\text{рс}} = 2$

4 Контрольные вопросы

1. Дайте определение регенерационного участка и регенератора. С какой целью линия передачи разбивается на регенерационные участки?
2. Перечислите основные источники помех, учитываемые при расчете длины регенерационного участка для магистралей с коаксиальным кабелем.
3. Что такое допустимая защищенность? Какие факторы влияют на ее величину?
4. Почему в симметричных кабелях основным видом помех являются

переходные влияния?

5. Какие два основных фактора ограничивают длину регенерационного участка ВОЛС? Поясните суть этих ограничений.

6. Из каких составляющих складывается общее затухание оптического линейного тракта? Что такое энергетический запас и для чего он нужен?

7. Что такое дисперсия? К каким последствиям для цифрового сигнала она приводит? Чем хроматическая дисперсия отличается от межмодовой?

8. Как вероятность ошибки одного регенератора связана с вероятностью ошибки всей линии?

9. Как математически определяется уширение импульса τ в оптическом волокне?

Библиографический список

1. Дорошенко, В. М. Исследование процессов передачи информации в аналоговых и цифровых системах связи : Учебное пособие / В. М. Дорошенко, О. В. Дрогайцева. – Санкт-Петербург : Наукоемкие технологии, 2025. – 96 с.

2. Помехоустойчивость устройств приёма сигналов в цифровых системах связи / В. Г. Довбня, Д. С. Коптев, В. Г. Андронов, А. А. Чуев. – Курск : Юго-Западный государственный университет, 2025. – 239 с.