

**Министерство образования и науки РФ  
Севастопольский государственный университет**

**В . С . ЧЕРНЕГА**

конспект лекций по дисциплине

# **ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ**

**Часть 1**

для студентов дневной и заочной формы обучения

по направлениям

**"Информационные системы и технологии"**

**и «Прикладная информатика»**

**Севастополь  
2020**

**Ифокоммуникационные системы и сети.** Часть 1. Конспект лекций по дисциплине "Ифокоммуникационные системы и сети" для студентов дневной и заочной формы обучения / Сост. В.С.Чернега. — Севастополь: Изд. СевГУ, 2020.— 141 с.

В конспекте кратко изложены основные принципы построения коммуникационных систем, используемых в компьютерных сетях. Рассматриваются структуры и виды коммуникационных сетей, методы разделения каналов и способы реализации аппаратуры уплотнения физических линий связи. Приведена характеристика мешающих воздействий в каналах связи и методы борьбы с искажениями сигналов и ошибками данных. Изложены вопросы построения дискретных каналов с различными видами модуляции, способы синхронизации по единичным элементам и фазирования по циклам.

Рассмотрены основы построения коммуникационных компьютерных сетей, эталонная модель взаимодействия открытых систем, стек сетевых протоколов, а также архитектура локальных компьютерных сетей.

Рецензент:            канд. техн. наук, доц. Бондарев В.Н.

## Содержание

		Введение	5
<b>1.</b>		<b>Общая характеристика инфокоммуникационных систем и сетей</b>	<b>7</b>
	1.1.	Основные понятия и определения	7
	1.2.	Обобщенная структурная схема системы передачи данных	8
<b>2.</b>		<b>Инфокоммуникационные сети и линии связи</b>	<b>9</b>
	2.1.	Первичные коммуникационные сети и их характеристика	9
	2.2.	Вторичные коммуникационные сети и их характеристика	12
	2.3.	Линии связи, их параметры и характеристики	13
	2.3.1.	Общая характеристика электрических линий связи	13
	2.3.2.	Оптические линии связи и их характеристика	14
	2.3.3.	Первичные и вторичные параметры электрических линий	17
	2.3.4.	Параметры оптических линий связи	20
<b>3.</b>		<b>Каналы связи инфокоммуникационных сетей</b>	<b>23</b>
	3.1.	Общие принципы уплотнения линий и организации каналов	23
	3.2.	Частотное разделение каналов, аппаратура ЧРК	24
	3.3.	Временное разделение каналов	30
	3.4.	Аппаратура уплотнения с ИКМ	33
	3.5.	Параметры и характеристики каналов связи	36
	3.6.	Общая характеристика глобальных телекоммуникационных сетей	39
	3.7.	Плезиохронная цифровая иерархия PDH	41
	3.8.	Синхронная цифровая иерархия SDH	43
	3.9.	Цифровые оптические сети спектрального мультиплексирования	47
<b>4.</b>		<b>Сигналы в системах передачи данных</b>	<b>49</b>
	4.1.	Общая характеристика и способы модуляции сигналов данных	49
	4.2.	Способы передачи сигналов	52
	4.3.	Временные и энергетические характеристики дискретных сигналов	53
	4.4.	Спектры импульсов постоянного тока	54
	4.4.1.	Спектры немодулированных сигналов передачи данных	54
	4.4.2.	Спектры видеосигналов типа $1:(\alpha-1)$	58
	4.5.	Спектры дискретных модулированных сигналов	59
	4.6.	Связь между скоростью передачи и шириной канала	66
<b>5.</b>		<b>Помехи в линиях и каналах связи</b>	<b>67</b>
	5.1.	Аддитивные и мультипликативные помехи	67
	5.2.	Статистические характеристики флуктуационных помех	68
	5.3.	Импульсные помехи, занижения уровня и кратковременные перерывы	69

<b>6.</b>	<b>Обработка сигналов в приемниках СПД</b>		<b>72</b>
	6.1.	Искажения посылок при передаче дискретной информации	72
	6.2.	Способы регистрации единичных элементов	75
	6.2.1.	Стробирование	75
	6.2.2.	Интегральный способ регистрации	76
	6.3.3.	Комбинированный способ регистрации	77
	6.4.	Исправляющая способность приемника	78
<b>7.</b>	<b>Методы повышения верности передачи данных</b>		<b>80</b>
	7.1.	Общая характеристика	80
	7.2.	Системы с решающей обратной связью	81
	7.3.	Системы с информационной обратной связью	84
<b>8.</b>	<b>Синхронизация в системах передачи данных</b>		<b>85</b>
	8.1.	Синхронизация по единичным элементам	85
	8.2.	Цикловое фазирование в СПД	88
	8.2.1.	Общая характеристика	88
	8.2.2.	Безмаркерные способы циклового фазирования	90
	8.2.3.	Маркерный способ фазирования	93
<b>9.</b>	<b>Архитектура и протоколы компьютерных сетей</b>		<b>96</b>
	9.1.	Обобщенная структура компьютерных сетей.	96
	9.2.	Топология компьютерных сетей	100
	9.3.	Эталонная модель взаимодействия открытых систем	101
	9.4.	Коммуникационные протоколы компьютерных сетей	104
	9.5.	Способы коммутации в компьютерных сетях	109
	9.6.	Адресация в сети Интернет	120
<b>10.</b>	<b>Локальные компьютерные сети</b>		<b>122</b>
	10.1.	Топология локальных компьютерных сетей	122
	10.2.	Методы доступа к среде	123
	10.3.	Общая характеристика сетей Ethernet и Token Ring	126
	10.4.	Архитектура локальной сети Ethernet	129
	<b>Рекомендуемая литература</b>		<b>135</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Коммуникационные системы и сети предназначены для передачи информационных сообщений различного вида между пользователями сети. Информационные сообщения подразделяются на следующие виды:

- голосовые (речевые сообщения – телефонная связь);
- неподвижные (факсимиле) и подвижные (телевизионные) видеосообщения;
- текстовые (телеграфная и телетайпная связь);
- данные (информация для обработки вычислительными машинами);
- управляющие (передача команд для управления техническими объектами);
- телеизмерительная информация (телеметрия, информационно-измерительные системы);
- другие виды сообщений.

Первые три вида сообщений называют также мультимедийными сообщениями.

Передача указанных видов сообщений имеет определенную специфику. Поэтому для передачи соответствующих видов сообщений строятся специальные коммуникационные системы и сети: телефонные, телеграфные, факсимильные сети, радиовещания и телевидения, сети передачи данных, компьютерные сети и др. В настоящее время происходит объединение большинства видов сетей в единую (интегральную) сеть передачи цифровых сообщений.

В информационных системах, технической основой которых являются электронно-вычислительные машины (ЭВМ), передача сообщений осуществляется между ЭВМ (компьютерами) или между человеком и компьютером. В связи с тем, что компьютер является цифровым устройством, то и сообщения, вводимые в компьютер, или выдаваемые им, должны быть представлены в цифровой форме. Сообщения, представляемые в цифровой форме и предназначенные для ввода в компьютер и обмена между ними, называются **данными**. Для передачи такого вида сообщений разработаны специальные системы передачи данных (СПД). Системы передачи данных являются важнейшей составляющей частью информационных компьютерных сетей, обеспечивая обмен данными как между пользователями сети и серверами, так и между любыми абонентами сети. Основная задача систем передачи данных – передача дискретной информации по линиям и каналам связи от источника к получателю с заданной скоростью и верностью.

В современных информационных сетях около 60% технических средств составляет линейное оборудование и аппаратура передачи данных. Специалистам, занимающимся проектированием и администрированием инфокоммуникационных сетей необходимо хорошо ориентироваться в широком спектре систем передачи данных, чтобы осуществить оптимальный выбор таких средств, обеспечивающий минимальные затраты на создание и эксплуатацию сетей.

Существует множество способов передачи данных. Выбор того или иного способа передачи определяется как видом линии или канала связи, по которому осуществляется передача, так и характером мешающих воздействий в них.

В процессе доставки сообщений от источника к получателю в системах передачи данных решаются задачи устранения избыточности сообщений, поступающих от источ-

ника, борьбы с искажениями сигналов и ошибками, синхронизации передающих и приемных устройств, согласования характеристик передаваемых сигналов со средой передачи. В современных системах передачи данных эти задачи реализуются программно-аппаратными средствами на базе микроконтроллеров, сигнальных и универсальных микропроцессоров.

Целью настоящего пособия является ознакомление студентов с основами построения и функционирования систем передачи данных, особенностями и характеристиками линий и каналов связи и влияния их на передаваемые сигналы, характером мешающих воздействий в каналах, методами их математического описания и способами оптимального построения приемо-передающих устройств. Данное пособие является только введением в теорию систем передачи данных. Для более глубокого изучения студентам необходимо самостоятельно прорабатывать специальную литературу, перечень которой приведен в библиографическом списке.

# 1. Общая характеристика инфокоммуникационных систем и сетей

## 1.1. Основные понятия и определения

Для передачи данных в компьютерных сетях преимущественно используются линии и каналы электросвязи, в которых сигналы передаются в виде посылок электрического тока или напряжения. Основной организацией, регламентирующей процессы передачи информации по каналам электросвязи, является Международный Союз Телекоммуникаций **ITU** (*International Telecommunications Unit*). До 1994 года его функции выполнял Международный Консультативный Комитет по Телефонии и Телеграфии (**МККТТ**), английская транскрипция **ССИТТ** (*International Telegraph and Telephone Consultative Committee*). Этот комитет разрабатывал и разрабатывает, в частности, рекомендации в области систем и сетей передачи данных. Рекомендации, относящиеся к передаче данных по телефонным сетям, обозначаются символом **V**, передачи по кабельным линиям – символом **G**, а к передаче по цифровым сетям передачи данных – символом **X**.

**Передача данных** — по определению МККТТ – *это область электросвязи, целью которой является передача информации для обработки ее вычислительными машинами или уже обработанной ими.*

Прежде, чем приступить к рассмотрению содержания дисциплины "Коммуникационные системы и сети" (КСиС), повторим основные термины и определения теории информации.

Под информацией в общем понимают совокупность объективных сведений о каком-либо явлении, событии, объекте. В информатике **Информация** – это сведения, являющиеся объектом передачи, распределения, преобразования, хранения или непосредственного использования. Под **информацией в системах передачи данных** понимают сведения, подлежащие передаче и заранее **не известные получателю**.

**Источником и получателем** информации в СПД являются персональные компьютеры и сетевые рабочие станции, различные цифровые датчики и устройства отображения. Источник и получатель в общем случае называют конечным оборудованием данных (**ООД**).

**Сообщение** – форма представления информации (телеграфное, телефонное, телевизионное, изображение, текст и т.п.).

**Сигнал** – физический процесс, однозначно отображающий сообщение. В информационных системах под сигналом понимается электрические или оптические возмущения, однозначно отображающие передаваемое сообщение.

Среда передачи, по которой распространяются сигналы, называется **линией связи**. В качестве **среды распространения сигналов** используются физические линии (пара изолированных проводов, кабель, волновод), радиолинии (область пространства, в котором распространяются электромагнитные волны), а также оптические и другие (акустические, инфракрасные и т.д.) линии связи. При распространении сигналов по линиям на них могут воздействовать различные **помехи**, имеющие случайный характер.

**Канал связи** — независимый тракт передачи сигналов от источника к получателю, созданный каналообразующей аппаратурой (аппаратурой уплотнения) путем использования части ресурсов линии связи. В компьютерных системах такой тракт часто называют "виртуальный канал".

Сообщение и соответствующие им сигналы бывают дискретными или непрерывными. Непрерывное сообщение – это некоторая физическая величина (звуковое давление, температура, электрический ток и т.п.), принимающая любые значения в заданном интервале. Дискретное сообщение представляет собой последовательность отдельных элементов. Физическая природа этих элементов может быть любой. Сигнал в таком случае также представляет собой дискретную во времени и по уровню последовательность отдельных элементов, соответствующих элементам отображаемого сообщения.

Непрерывные сигналы непрерывного времени (аналоговые) могут изменяться в произвольные моменты времени, принимая любые значения из непрерывного множества возможных значений (рисунок 1.1,а). Дискретные сигналы дискретные во времени. Они могут принимать конечное число значений в дискретные моменты времени. Их называют также цифровыми сигналами данных (рисунок 1.1,б).

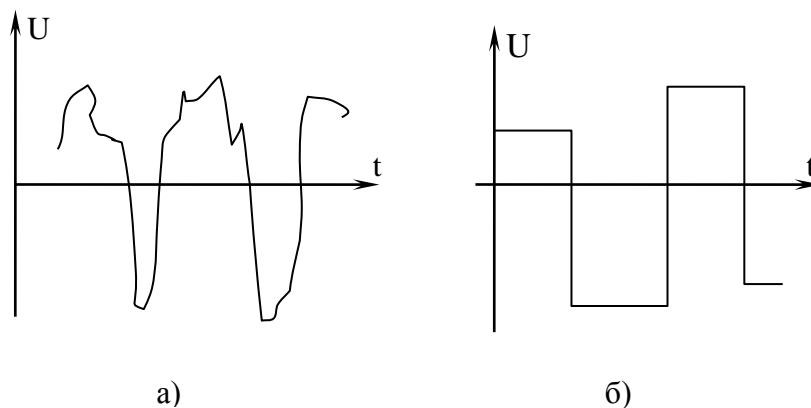


Рисунок 1.1 – Виды сигналов в электросвязи: а) непрерывные; б) дискретные

## 1.2. Обобщенная структурная схема СПД

Обобщенная структурная схема системы передачи данных показана на рисунке 1.2. Информационное сообщение в электрической форме поступает на вход системы передачи данных, где оно вначале подвергается кодированию.

**Кодирование** – это преобразование сообщений в определенные сочетания элементарных дискретных элементов, называемых кодовыми комбинациями или словами (числами). Целью кодирования является *согласование источника сообщения с каналами связи*, обеспечивающими либо максимально возможную скорость передачи, либо максимальную помехоустойчивость. В компьютерных сетях задачей кодирования является уменьшение объема информации, подлежащей передаче, и повышение ее помехоустойчивости. Процедура кодирования состоит из двух частей: **кодирование источника** и **кодирование канала**. Целью кодирования источника является устранение избыточности в сообщении (сжатие информации). Задачей кодирования канала (помехоустойчивое кодирование) является введение избыточности в передаваемое сообщение таким образом, чтобы обеспечить максимальную помехоустойчивость информации на приемной стороне при наличии в канале связи мешающих воздействий.



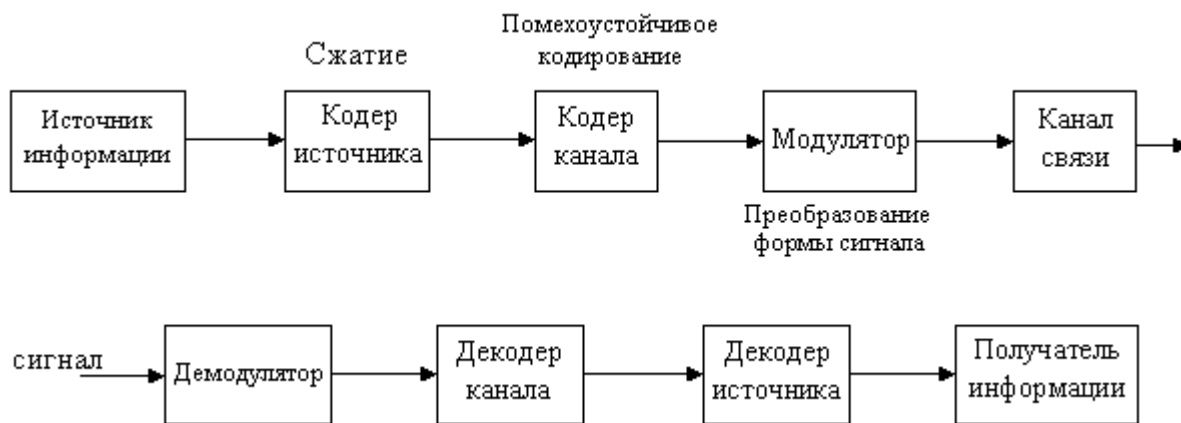


Рисунок 1.2 – Обобщенная структурная схема системы передачи данных

После кодирования производится модуляция переносчика сигналов закодированным сообщением. **Модуляцией** называется изменение параметра(ов) переносчика сигнала в соответствии с функцией, отображающей передаваемое сообщение. Целью модуляции является согласования параметров сигналов с характеристиками канала связи и обеспечение максимальной помехоустойчивости приема сигналов при наличии помех в канале.

Задачей приемной части СПД является обработка сигналов, искаженных помехами и обратное преобразование (декодирование) с целью восстановления передаваемого сообщения.

## 2. Инфокоммуникационные сети и линии связи

### 2.1. Первичные коммуникационные сети и их характеристика

Передача информации между пользователями компьютерных сетей осуществляется по сети связи, которая представляет собой совокупность взаимосвязанных узлов и линий (каналов) связи (рисунок 2.1), предназначенных для доставки информации в соответствии с заданным адресом и для обеспечения соответствующих качественных показателей по времени доставки, верности и надежности. Узлы сети делятся на **оконечные пункты (ОП)** и **узлы связи (УС)**. Узлы связи предназначены для распределения потоков сигналов, циркулирующих между источником и получателем. Наличие узлов позволяет существенно сократить количество линий связи в сети за счет многократного использования одних и тех же линий.

Различают узлы связи 2-х основных видов – **коммутационные и сетевые**. Коммутационные узлы обеспечивают коммутацию каналов или сообщений между всеми сходящимися в узле каналами или линиями от оконечных пунктов и других узлов. В сетевых узлах производится **кроссирование** (долговременное переключение) сходящихся в узле каналов и линий для организации пучков прямых каналов.

По виду сообщений, передаваемых между абонентами, сети связи делятся на следующие: телефонные, телеграфные, передачи данных, радиовещания и телевидения, телеуправления и телесигнализации и т. д. Количество таких сетей может быть очень велико,

с дальнейшим развитием науки и техники потребность в различных сетях передачи информации будет возрастать. Важно, чтобы создание и развитие разных сетей происходило в рамках единой системы с использованием стандартных каналов и оборудования, принципов передачи и распределения информации, а также с учетом общегосударственных интересов. Решению этой задачи способствовало создание и развитие Единой сети электросвязи России (ЕСЭ).

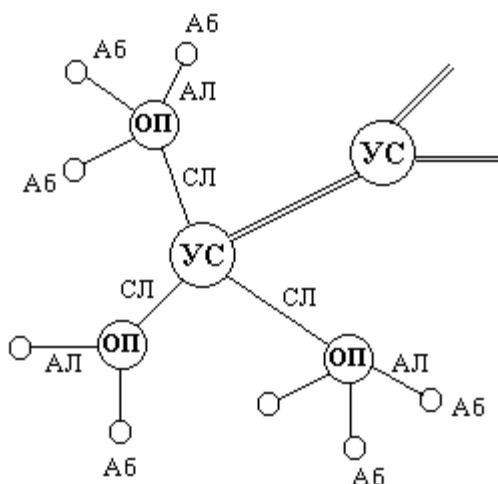


Рисунок 2.1 – Пример структуры сети связи

Основой ЕСЭ является **первичная сеть**, представляющая собой комплекс, состоящий из линий связи различных типов (кабельные, воздушные, радиорелейные, волноводные, световодные, спутниковые и др.) и аппаратуры многоканальных систем передачи (аппаратуры уплотнения), позволяющей организовать на каждой линии одновременную и независимую передачу сигналов от многих источников. **Каналом связи** называется независимый тракт передачи сигналов от источника к получателю, образованный аппаратурой уплотнения на физической линии путем использования части ресурсов этой линии.

Канал связи представляет собой совокупность линий связи, технических и программных средств, обеспечивающих передачу сигнала от источника к потребителю. В состав технических средств входит аппаратура многоканальной системы передачи, линейные усилительные устройства, системы дистанционного питания, телеконтроля, служебной связи и др.

Основным звеном первичной сети являются системы передачи с частотным (ЧРК) и временным (ВРК) разделением каналов, в частности, цифровые системы передачи с импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ).

Первичная сеть отражает существующую административную структуру страны. По территориальному признаку она подразделяется на магистральную, внутризоновую и местные первичные сети. Магистральная соединяет каналами и линиями различных типов все областные центры. Часть первичной сети, ограниченной территорией одной зоны, совпадающей с границами области или автономной республики, называется **внутризоновой** сетью. В отдельных случаях на территории области могут оказаться две внутри-

зоновые сети, или одна внутризональная сеть может охватывать несколько областей. Внутризональная сеть соединяет различными каналами райцентры области друг с другом и с областным центром.

Местные первичные сети ограничены территорией города или сельского района. Местные первичные сети городов представляют собой совокупность каналов или физических пар проводов между станциями и узлами этих сетей, а также между абонентами. Первичные сети сельских районов образуются объединением узлов и станций сельского района друг с другом и с абонентами.

Среди магистральных и внутризональных сетевых узлов самыми крупными являются территориальные сетевые узлы, которые располагаются на пересечении нескольких достаточно мощных кабельных и радиорелейных линий. На этих узлах все линии заканчиваются оконечной аппаратурой систем передачи (каналообразующей аппаратурой). С их помощью можно соединять каналы и группы каналов, принадлежащие разным системам передачи, а также выделять каналы потребителям.

На пересечении кабельных и радиорелейных линий малой мощности располагаются узлы переключения, где происходит переключение каналов с одной оконечной аппаратуры на другую, а также усиление сигналов. На магистральных и внутризональных первичных сетях устанавливаются сетевые узлы выделения, организующие выделение каналов потребителям. На местных сетях территориальные сетевые узлы и узлы выделения не устанавливаются. В состав первичной сети входят также сетевые станции, которые являются оконечными точками соответствующих первичных сетей. Магистральные, зоновые или местные сетевые станции размещаются совместно с сетевыми узлами, либо в удалении, соединяясь с ними соединительными линиями.

Для организации каналов связи на линиях первичной сети применяются аналоговые (с ЧРК) и цифровые (с ИКМ и дельта-модуляцией) многоканальные системы передачи. В основе созданной первичной сети лежит **телефонный** канал, т.к. исторически сеть связи создавалась для передачи речевых сообщений. При создании аппаратуры передачи, обеспечивающей организацию большого числа каналов, оказалось целесообразным наращивать емкости системы последовательной организацией и объединением групп каналов. Это позволило более эффективно использовать каналообразующее оборудование и обеспечить его широкую унификацию.

Аналоговая аппаратура уплотнения с ЧРК позволяет образовывать следующие типовые каналы:

- стандартный телефонный канал тональной частоты (ТЧ) с полосой пропускания от 0,3 до 3,4 кГц;
- первичный широкополосный канал с полосой пропускания 60-108 кГц, который состоит из 12 каналов ТЧ, перенесенных в диапазон 60-108 кГц;
- вторичный широкополосный канал, содержащий 5 первичных 12-ти канальных групп (60 каналов ТЧ), перенесенных в диапазон частот 312-552 кГц (фактическая полоса составляет 312,3 - 551,4 кГц);
- третичный широкополосный канал, состоящий из пяти вторичных групп (300 каналов ТЧ), перенесенных в диапазон частот 812 - 2044 кГц;
- четверичный широкополосный канал – из трех третичных групп (900 каналов ТЧ), перенесенных в диапазон частот 8516 - 12388 кГц.

Наряду с аналоговыми системами передачи на внутризональных и местных участках первичной сети начали широко применяться системы уплотнения с ИКМ. В настоящее время определились следующие типы групп уплотнения:

- основная цифровая группа (ОЦ), соответствующая основному каналу ТЧ в аналоговых сетях, скорость передачи 64 кбит/с;
- первичная цифровая группа, эквивалентная тридцати двум ОЦ, со скоростью передачи 2048 кбит/с, организована на основе аппаратуры уплотнения ИКМ-30 (2 канала используются для служебных целей);
- вторичная цифровая группа, созданная на основе аппаратуры ИКМ-120, скорость передачи в групповом тракте 8448 кбит/с;
- третичная цифровая группа, образованная объединением цифровых потоков четырех вторичных групп, скорость передачи 35 Мбит/с, создается на основе аппаратуры ИКМ-480;
- четвертичная цифровая группа, объединяющая цифровые потоки четырех третичных систем, образуя цифровой поток со скоростью 139 Мбит/с, что обеспечивает 1920 каналов ТЧ.

В настоящее время во всем мире происходит процесс объединения различных сетей в единую интегральную сеть, в которой все виды сообщений и сигналы управления передаются в единой цифровой форме по однотипным каналам связи. При этом можно выделить следующие ступени интеграции:

- создание единого канала для различных видов связи;
- объединение каналообразующей и коммутационной аппаратуры в единый комплекс;
- интеграция сетей электросвязи и сетей ЭВМ;
- объединение служб и средств эксплуатации всех видов связи.

Интеграция позволяет унифицировать элементную базу, широко использовать средства микропроцессорной техники и быстродействующую интегральную элементную базу, что повышает надежность, снижает затраты на создание и эксплуатацию аппаратуры, улучшает эксплуатационные характеристики и т.п.

Практически создание единого канала для всех видов информации стало возможно только после разработки ИКМ и создания системы передачи аналоговых сигналов цифровыми методами.

## 2.2 Вторичные коммуникационные сети и их характеристика

Первичная сеть не является сетью передачи только одного вида сообщения, а используется для построения на ней различного типа так называемых вторичных сетей. **Вторичная сеть** представляет собой совокупность соответствующих каналов, образованных путем вторичного уплотнения каналов первичной сети, а также станций, узлов и оконечных устройств, и предназначена для осуществления определенного вида связи. Вторичные сети подразделяются по признакам вида информации, для передачи которой они созданы (телефонная и телеграфная, передачи данных, радиовещания, телевидения,

и т.д.). Они могут разделяться также по ведомственной принадлежности (железнодорожная сеть, сеть связи магистральных газопроводов и т.п.). На современном этапе развития в ЕСЭ входят следующие вторичные сети:

- автоматизированная сеть телефонной связи общего пользования (ТФ ОП), которая одновременно может применяться для передачи данных и других видов информации, передачу которых она обеспечивает в пределах, допустимых электрическими характеристиками каналов и пропускной способности;

- сеть телеграфной связи между предприятиями связи;
- сети передачи данных (компьютерные сети);
- сеть передачи программ радиовещания и телевидения;
- сеть фототелеграфной передачи газет;
- факсимильной связи (передача текста и неподвижных изображений) — факс;
- различные ведомственные сети.

Вторичные сети не всегда являются независимыми друг от друга. В ряде случаев отдельные вторичные сети могут сливаться на базе общих каналов первичной сети и коммутационных устройств этих вторичных сетей, но информационные потоки из одной сети не допускаются в другую.

Большая часть сетей является **коммутируемыми**, в которых тракт передачи между абонентами существует только на время передачи информации между ними. В последующее время тракт передачи сигналов или его отдельные части могут быть отданы другим абонентам. Некоммутируемая сеть состоит из каналов, *постоянно* выделенных для передачи сигналов только между двумя абонентами.

Общегосударственная **сеть телефонной связи общего пользования** (ТФ ОП) является коммутируемой сетью и позволяет устанавливать соединения между двумя любыми абонентами страны. Она состоит из автоматических телефонных станций (АТС), узлов автоматической коммутации, межстанционных соединительных линий и абонентских линий связи, соединяющих АТС с абонентами. ТФ ОП проектировалась и создавалась для передачи телефонных сообщений. Благодаря большой разветвленности, доступности и невысокой стоимости каналов ТФ ОП, они широко использовались для передачи данных и других видов информации. Для этого достаточно было заменить абонентские телефонные аппараты на аппаратуру передачи данных или другое оконечное оборудование. В настоящее время для передачи данных все больше используются специализированные сети и выделенные цифровые линии связи.

## 2.3 Линии связи, их параметры и характеристики

### 2.3.1 Общая характеристика электрических линий связи

**Линии связи** (ЛС) являются обязательным элементом любой системы связи. В электросвязи применяются линии проводной связи, радиорелейные ЛС и линии радиосвязи, а также оптические линии. Наиболее широкое применение в современных компьютерных сетях находят проводные линии. **Проводная линия связи** представляет собой пару изолированных проводников, предназначенных для передачи электрических сигна-

лов. Проводные линии связи разделяются на воздушные и кабельные. **Воздушные линии (ВЛ)** состоят из металлических проводов, подвешенных с помощью изоляторов и специальной арматуры на вертикальных опорах. На ВЛ используются стальные, медные, биметаллические (сталемедные и сталеалюминиевые) провода диаметром от 1,5 до 6,5 мм. **Кабелем связи** называется система, состоящая из изолированных пар проводов, заключенных в общую влагозащитную оболочку и броневые покрытия (последние имеются не всегда).

По условиям прокладки кабели подразделяются на подземные, подводные и воздушные. По конструкции и расположению проводников кабели делятся на симметричные и коаксиальные.

**Симметричная линия связи** состоит из двух совершенно одинаковых в конструктивном и электрическом отношении изолированных скрученных проводников (рисунок 2.2,а). Здесь  $H$  – шаг скрутки пары проводников. Симметричные кабели в зависимости от способа скрутки жил группы подразделяются на кабели парной скрутки кабели четверочной (звездной) скрутки.

**Коаксиальный кабель** представляет собой сплошной проводник (круглого сечения), concentрически расположенный внутри другого полого проводника (цилиндра). Оси обоих проводников совмещены (рисунок 2.2,б).

По спектру передаваемых частот симметричные кабели подразделяются на низкочастотные (до 100 кГц) – кабели парной и звездной скрутки, и высокочастотные (свыше 100 кГц) – кабели звездной скрутки. Коаксиальные кабели всегда высокочастотные.

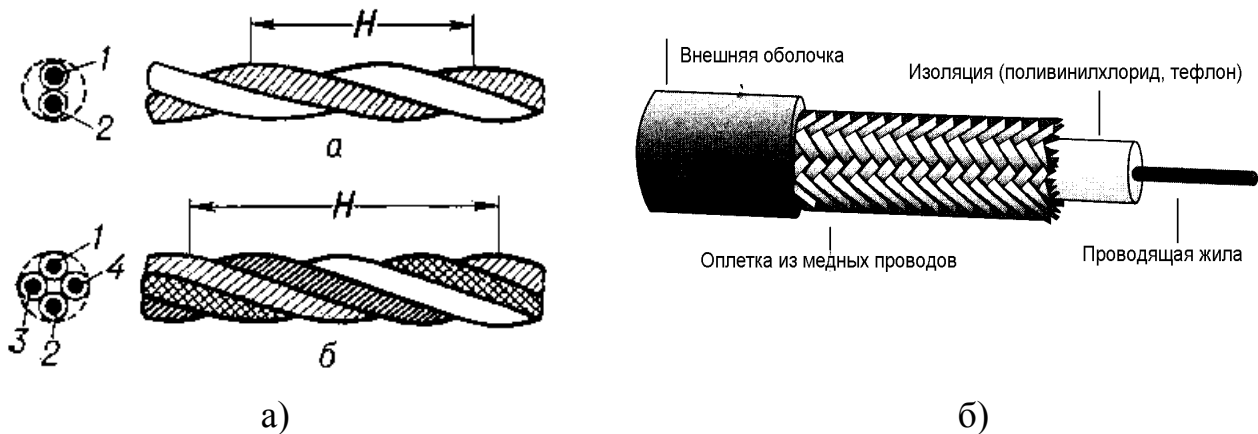


Рисунок 2.2 – Конструкция симметричных (а) и коаксиального (б) кабелей связи

### 2.3.2. Оптические линии связи и их характеристики

Для создания оптических систем связи широко применяются **волоконно-оптические кабели (fiber-optic cable)**. Они заметно конкурируют с некоторыми видами коаксиальных кабелей и являются основной средой передачи в высокоскоростных моноканалах локальных компьютерных сетей. В качестве физической среды распространения сигналов используются сверхпрозрачное стекловолокно или волокно, изготовленное на

базе полимеров. Простейший оптический кабель состоит из светопроводящей (кварцевой или полимерной) сердцевины диаметром 2-200 мкм, окруженной тонкой пластмассовой или стеклянной пленкой со значительно меньшим коэффициентом преломления, чем в сердцевине. Этим достигается практически полное внутреннее отражение световых потоков.

По своей конструкции волоконно-оптическая линия подобна коаксиальному кабелю. Однако вместо центральной жилы в ее центре располагается сердцевина, окруженная оптической оболочкой, покрытой тонким слоем лака. Сердцевина и оболочка изготавливается как одно целое. Оболочка имеет толщину от сотен микрометров до единиц миллиметров. Типовой диаметр оболочки – 125 мкм. Оболочка может быть покрыта дополнительно буферным слоем, который в свою очередь может быть свободным (жесткая пластиковая трубка) или плотно прилегающим (рис.2.3). Свободный слой защищает от механических повреждений и температуры, прилегающий – только от механических повреждений. Элементы усиления выполняются из стальной проволоки, нитей *кевлара* (вид особопрочной пластмассы) и т.д. Внешнее покрытие изготавливается аналогично покрытию электрических кабелей. Кроме этого, оптический кабель содержит элементы усиления его механической прочности и внешнее покрытие.

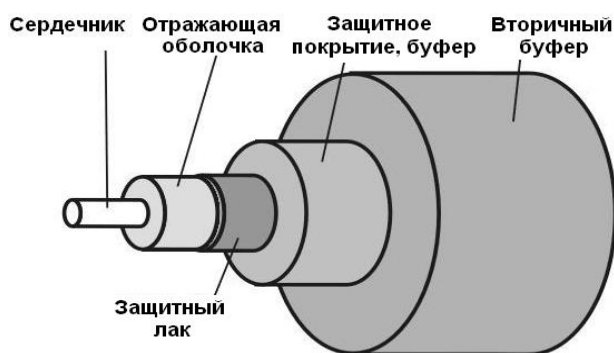


Рисунок 2.3 – Конструкция волоконнооптической линии связи

Конструкция одного из вариантов оптического кабеля изображена на рис.2.4. Другие варианты конструкций оптических кабелей можно посмотреть в Интернете.

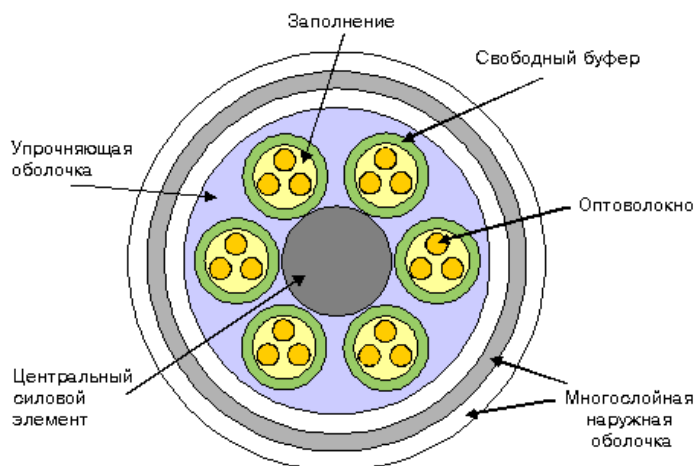


Рисунок 2.4 – Конструкция оптического кабеля

Скорость передачи сигналов по оптическому кабелю составляет 2-5 Гбит/с и выше. Затухание оптического кабеля имеет величину 0,2-10 дБ/км, причем оно незначительно возрастает с ростом частоты передачи сигналов. Каждое оптоволокно передает сигналы только в одном направлении, поэтому кабель состоит из двух волокон с отдельными коннекторами. Для защиты от внешних воздействий кабель имеет общее покрытие из пластика, а для повышения прочности внутри кабеля, наряду с оптоволокном, проложены нити из кевлара.

Различают два типа оптических кабелей: **многомодовые** и **одномодовые**. По слову "мода" понимают световые лучи внутри кабеля, которые имеют одинаковые углы отражения. В многомодовых кабелях распространяются несколько световых лучей, которые попадают на границу раздела оптических свойств и отражаются от нее под различными углами. Лучи, распространяющиеся в середине световода (без отражения) имеют моду нулевого порядка, так называемые аксиальномодовые лучи. Одномодовые кабели имеют настолько малый диаметр, что в нем возможно распространения лучей только нулевой моды. Наружный диаметр оболочки в многомодовом и одномодовом волокне одинаков и составляет 125 мкм. Однако диаметр сердцевины в многомодовом волокне 50 или 62,5 мкм, в одномодовом 8,6 – 9,5 мкм.

На рисунке 2.5 показана схема распространения лучей в многомодовых и одномодовых волоконно-оптических линиях при различном профиле изменения коэффициента преломления лучей в среде распространения. Различный коэффициент преломления и его распределение внутри сердцевины достигается путем введения специальных добавок в оптическую массу в процессе производства (вытягивания) кабельной нити.

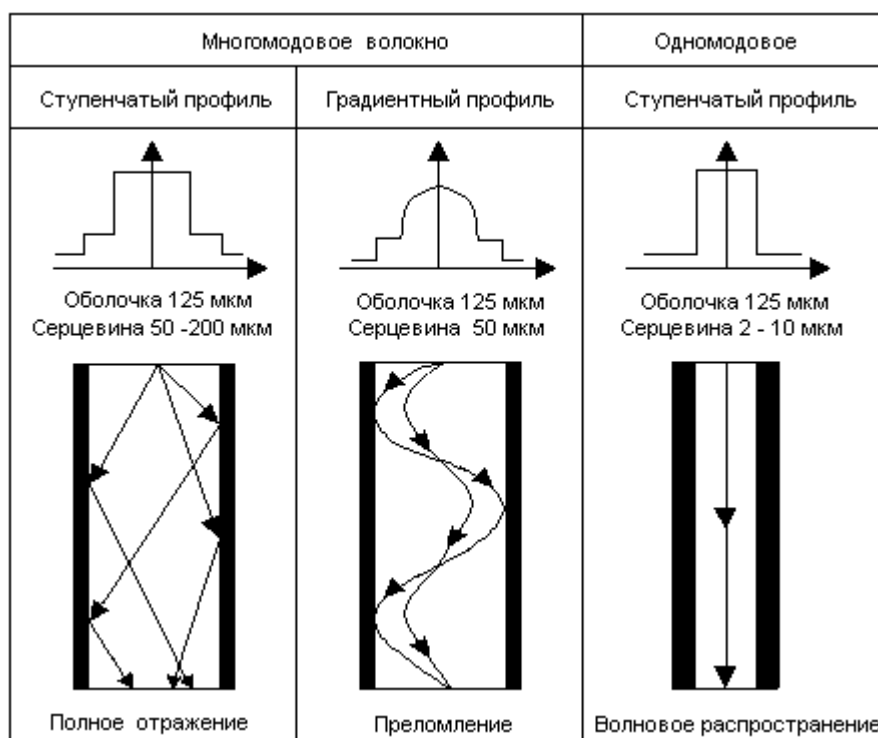


Рисунок 2.5 – Схема распространения лучей в волоконно-оптической линии и зависимости коэффициента преломления лучей



В связи с тем, что в многомодовом кабеле одновременно распространяется несколько лучей одного и того же сигнала, имеющих различное время прохождения, то результирующий сигнал на выходе кабеля расширяется и происходит межсимвольная интерференция передаваемых единичных элементов, которая возрастает с увеличением длины кабеля. Это затрудняет различение и регистрацию единичных элементов. В связи с этим приходится ограничивать скорость передачи в многомодовых волоконно-оптических линиях связи. В одномодовых кабелях межсимвольная интерференция практически отсутствует. Поэтому скорость передачи в таких линиях связи выше.

Существенным преимуществом волоконно-оптического кабеля, кроме высокой пропускной способности, является независимость от внешних электромагнитных полей. Кроме того, по сравнению с медными проводами, оптоволоконные кабели несравненно легче. Так, одна тысяча скрученных пар при длине 1 км весит 8 тонн, а два волокна той же длины, обладающие большей пропускной способностью, имеют вес всего 100 кг. Это обстоятельство открывает возможность прокладки оптических кабелей вдоль высоковольтных силовых линий передачи.

Основной недостаток волоконно-оптических линий — высокая стоимость производства компонентов, а также большие затраты на их монтаж и ремонт. Для обеспечения большей пропускной способности линии связи промышленностью выпускаются оптоволоконные кабели, содержащие несколько (до 8) одномодовых волокон с малым затуханием. Разработаны и производятся кабели для распределительных сетей, которые могут содержать до 216 волокон как одномодовых, так и многомодовых.

### 2.3.3 Первичные и вторичные параметры электрических линий связи

Электрические свойства проводных линий характеризуются их основными, или первичными параметрами, отнесенными к одному километру длины. **Первичными** параметрами цепи ЛС являются:

- 1) активное сопротивление  $R$ , [Ом/км];
- 2) индуктивность  $L$ , [Гн/км];
- 3) емкость между проводами  $C$ , [Ф/км];
- 4) проводимость изоляции между проводами  $G$ , [Сим/км].

**Сопротивление проводов** зависит от их диаметра и материала. На сопротивление проводов влияет температура окружающей среды. Индуктивность и емкость линии определяется, в основном, расстоянием между проводами и диаметром проводов. Емкость кабельных линий, кроме того, зависит также от материала диэлектрика между проводами. В настоящее время наиболее широко применяются электрические медные кабели диаметром 0,4 или 0,5 мм.

**Проводимость изоляции** воздушных линий зависит от погоды, а кабельных — от типа изоляции. Линии связи, у которых первичные параметры остаются неизменными по всей длине, называются однородными. При расчетах однородных линий связи по первичным параметрам пользуются эквивалентной схемой для 1 км цепи (рисунок 2.6).

Кроме первичных параметров, проводные линии характеризуются также вторичными параметрами, к которым относятся волновое сопротивление  $Z_v$  и коэффициент распространения сигнала  $\gamma$ , составляющими которого являются коэффициент затухания  $\alpha$  и

коэффициент фазы  $\beta$  сигнала. Величина волнового сопротивления зависит от первичных параметров линии и частоты тока.

Волновые параметры ЛС определяются по следующим формулам:

$$Z_B = \sqrt{(R+j\omega L)/(G+j\omega C)} = |Z_B| e^{j\omega\phi\beta};$$

$$\gamma = \sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)} = \alpha + j\beta = |j| e^{j\phi\gamma};$$

$$\alpha \approx R/2 \sqrt{C/L} + G/2 \sqrt{L/C}; \quad \beta \approx \omega \sqrt{LC}.$$

Волна напряжения и тока, приходящая к концу линии, отдает нагрузке всю энергию только в том случае, когда сопротивление нагрузки равно волновому сопротивлению линии связи. В противном случае часть энергии возвращается от конца линии к ее началу в виде отраженной волны тока и напряжения и искажает передаваемые сигналы. Поэтому условием неискаженной (и максимальной мощности) передачи сигналов является равенство сопротивления нагрузки волновому сопротивлению линии связи. Согласование сопротивлений обычно производится через согласующий трансформатор.

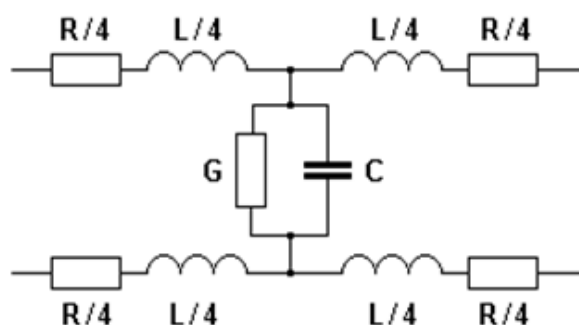


Рисунок 2.6 – Эквивалентная схема симметричной двухпроводной линии связи

Линия, по которой в данный момент времени передаются электрические сигналы, называется активной. Активная пара, естественно, создает электромагнитное поле. Это поле может оказывать влияние на другие находящиеся поблизости соседние пары, т.е. создавать так называемые *перекрестные помехи*. Схема влияния активной линии на соседние пары показана на рисунке 2.7.

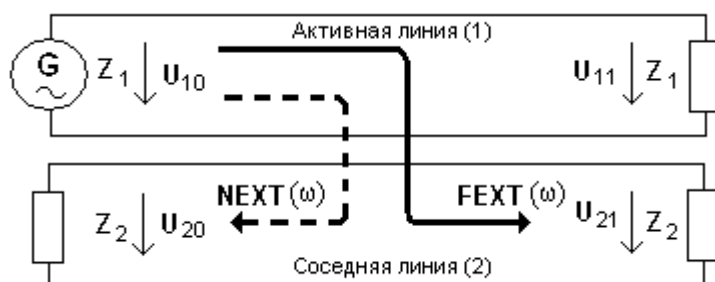


Рисунок 2.7 – Схема воздействия активной линии кабеля на соседнюю пару

Степень мешающего воздействия активной линии оценивается посредством переходных **затуханий** между парами проводов **на ближнем и дальнем концах линии (NEXT, FEXT)**. Здесь параметр **NEXT** (*Near End Crosstalk*) – переходное затухание измеренное на ближнем конце соседней пары, а **FEXT** (*Far End Crosstalk*) – переходное затухание, измеренное на дальнем конце соседней пары. С увеличением частоты сигнала переходные затухания уменьшаются. Количественно эти параметры оцениваются следующим образом:

$$\text{NEXT} = 20\lg (U_{10}/U_{20}) \text{ дБ}; \quad \text{FEXT} = 20\lg (U_{10}/U_{21}) \text{ дБ}. \quad (2.3)$$

Параметр FEXT характеризует интенсивность перекрестных помех на дальнем конце линии, т. е. перекрестные помехи измеряются на другом конце по отношению к источнику сигнала. Сам по себе параметр FEXT не представляет интереса для измерений ввиду зависимости его от длины линии. Две линии на базе компонентов одной и той же категории, но разной длины, будут иметь различные значения FEXT. Поэтому для измерений был выбран параметр ELFEXT (*Equal Level Far End Crosstalk*).

$$\text{ELFEXT} = \text{FEXT} - \alpha_2. \quad (2.4)$$

С целью уменьшения степени мешающих воздействий на соседние пары кабеля уровень сигналов передачи нормируют. Так, например, уровень сигнала передачи данных по телефонным кабельным линиям ограничивают величиной минус 13 дБ в точке нулевого измерительного уровня (напряжение в которой равно 0,775 В).

Для симметричных линий введен еще ряд параметров, характеризующие их помехозащищенность.

**Защищенность от помех ACR** (*Attenuation to crosstalk ratio*) — это превышение сигнала над уровнем собственных шумов. Определяется разностью  $\text{ARC} = \text{NEXT} [\text{дБ}] - \alpha [\text{дБ}]$ .

**Скорость распространения сигналов NVP** (*Nominal Velocity of Propagation*) — относительная скорость распространения сигналов, выражающая в процентах замедление сигналов в витой паре относительно скорости света в вакууме. Может использоваться для определения места повреждения.

**Задержка прохождения сигналов** (*Propagation Delay*) — представляет собой время распространения сигнала от одного конца линии до другого. Именно она является причиной ограничения длины кабельных линий для сетевых приложений.

**Разброс задержек прохождения сигналов** (*Skew*) — Максимальная разность задержек прохождения сигнала между всеми парами. Разброс вызывается в значительной степени различным шагом скрутки каждой из пар (который делается для уменьшения взаимного влияния NEXT и FEXT) и как следствие разной электрической длиной пар. На разброс задержек в меньшей степени оказывает влияние также неоднородность параметров медных проводников и диэлектриков изоляции, обуславливающая различную скорость распространения электромагнитной волны. Введение параметра разброса задержки прохождения сигналов обусловлено тем, что некоторые локальные компьютерные сети, такие, например, как 100VG AnyLAN, 100BASE-T4, 1000BASE-T, используют для передачи сигналов одновременно все четыре пары симметричного кабеля. Если задержка

прохождения сигнала в одной паре существенно отличается от задержки прохождения сигнала в другой паре, то это может привести к их рассинхронизации до такой степени, что восстановление исходного сигнала на приемной стороне будет невозможно. Задержка прохождения сигнала и разброс задержки сигнала обычно измеряются в наносекундах.

В настоящее время промышленностью выпускается 7 категорий кабеля UTP: 1-я категория – традиционный телефонный кабель, по которому можно передавать только речевые сигналы; 2 – для передачи данных со скоростью до 4 Мбит/с; 3 – для передачи данных со скоростью до 10 Мбит/с; 4 – до 16 Мбит/с; 5 – до 100 Мбит/с; категории 6 и 7 – свыше 100 Мбит/с.

Кабели категорий 2 – 5 состоят из 4 витых пар каждый. Волновое сопротивление всех этих кабелей равно 100 Ом. В витой паре один проводник является сигнальным, а второй используется в качестве общего провода, уравнивающего потенциалы на передающей и приемной станциях. В локальных компьютерных сетях наиболее широко используются кабели 3 и 5 категорий. Кабель третьей категории первоначально предназначался для телефонной связи. Он состоит из витых пар с 9-ю витками на метр длины. Кабель пятой категории разработан специально для компьютерных сетей. Ключевое различие между кабелями 3-й и 5-й категорий заключается в количестве витков скручивания пары проводников на единицу длины кабеля. В пятой категории количество витков на единицу длины кабеля в 3 раза больше чем в кабеле третьей категории (27 витков на метр). Это позволяет существенно повысить пропускную способность линии.

Категория 7 является единственной на данный момент стандартизированной средой передачи, которая без каких-либо оговорок способна обеспечивать передачу со скоростью 10 Гбит/с по линиях длиной до 100 м. В кабелях 7 категории существенно уменьшен уровень шумов. Этот фактор является очень важным, так как основным мешающим фактором для систем передачи данных, работающих со скоростью 10 Гбит/с, является тепловой шум. Уменьшение шумов в этом кабеле достигается благодаря особенностям конструкции кабеля и модульных разъемов. Пары состояются из жил диаметром не менее 0,58 мм, причем каждая пара заключается в индивидуальный экран из фольги. Экранирование каждой пары по всей окружности обеспечивается и в модульном разъеме. Благодаря этим мероприятиям, для такого кабельного оборудования являются менее ощутимыми наводки, в том числе и межкабельные.

#### 2.3.4. Параметры оптических линий связи

Одним из важнейших параметров оптической линии связи является рабочая **длина волны** оптических колебаний  $\lambda$  или центральная частота диапазона частот, отведенного для передачи оптического сигнала отдельного оптического канала. Длина волны связана с частотой колебаний  $F$  следующим соотношением:

$$F \cdot \lambda = c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с},$$

где  $c$  - скорость света в вакууме. Отсюда

$$F = c / \lambda, \text{ Гц}$$

Для широко используемых в ВОЛС длин волн 1310 нм эквивалентная частота

$$F = 3 \cdot 10^8 / 1310 \cdot 10^9 = 2,29 \cdot 10^{14} \text{ Гц} = 2,29 \cdot 10^5 \text{ ГГц} = 229 \text{ ТГц}.$$

При переводе длин волн в частоту для практических целей, например в системах с волновым уплотнением WDM, обычно используют более точную оценку скорости света, равную  $2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ .

Коэффициент затухания для заданной длины волны оптического излучения определяется как отношение вводимой в волокно оптической мощности к мощности принятого из волокна оптического сигнала. Обычно коэффициент затухания измеряется в децибелах на км (дБ/км) и зависит как от параметров оптического волокна, так и от длины волны светового потока. Затухание оптического волокна, определяется потерями на поглощение или рассеяние излучения в оптическом волокне. Потери на поглощения зависят от прозрачности материала, из которого изготовлено волокно. Потери на рассеяние зависят от неоднородности преломления материала. Затухание сигнала при определенной марке кабеля на единицу длины линии зависит от длины волны сигнала.

По сравнению с электрическим кабелем оптический кабель отличается существенно более низкими (по абсолютной величине) величинами затухания, обычно в диапазоне от 0,2 до 3 дБ при длине кабеля в 1000 м. Практически всем оптическим волокнам свойственна сложная зависимость затухания от длины волны, с тремя так называемыми «**окнами прозрачности**». Характерный пример показан на Рисунке 2.8. Как видно из рисунка, область эффективного использования современных волокон ограничена волнами длин 850, 1300 и 1550 нм, при этом окно в 1550 нм обеспечивает наименьшие потери, а значит, максимальную дальность при фиксированной мощности передатчика и фиксированной чувствительности приемника.

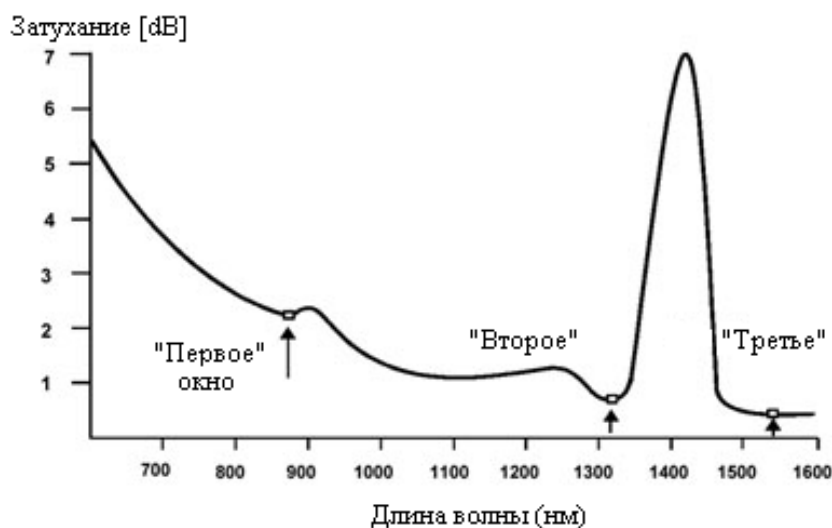


Рисунок 2.8 - Затухание оптического волокна от длины волны

Выпускаемый многомодовый кабель обладает двумя первыми окнами прозрачности, т. е. 850 и 1300 нм, а одномодовый кабель — двумя окнами прозрачности в диапазонах 1310 и 1550 нм.

**Отношение оптического сигнала к оптическому шуму** — отношение средней мощности оптического излучения сигнала к средней мощности оптического излучения шума в полосе частот оптического диапазона, выраженное в дБм.

**Дисперсия.** В общем случае, дисперсия - это "размывание" или растягивание светового импульса, происходящее во время передачи его в оптическом волокне. Количественно дисперсия определяется как квадратичная разность длительностей импульсов на выходе и входе кабеля длины  $L$  по формуле

$$\tau(L) = \sqrt{t_{\text{out}}^2 - t_{\text{in}}^2}.$$

Обычно дисперсия нормируется в расчете на 1 км, и измеряется в пс/км. Дисперсия сильно ограничивает скорость работы оптических систем, заметно снижая граничную полосу пропускания. Определены два основных вида дисперсии: модовая и хроматическая.

**Хроматическая дисперсия** – изменение формы огибающей оптического сигнала, обусловленное зависимостями постоянной распространения моды оптического сигнала и показателя преломления оптического волокна от длины волны. По-другому, это увеличение длительности оптических импульсов, обусловленное различием скоростей распространения его спектральных составляющих. Хроматическая дисперсия выражается в пс/(нм·км) и физически может быть выражена как разница времени прохождения оптического световода длиной один километр сигналами двух длин волн, причём эти длины волн должны лежать в заданной полосе спектра излучения оптического источника.

**Модовая дисперсия** связана с различным временем прохождения участка волокна световых мод, двигающихся по разным траекториям. В пределах числовой апертуры в многомодовое волокно может быть введено несколько сотен разрешенных мод. Все они будут распространяться по различным траекториям, имея различное время прохождения от источника до приемника. Суммарный импульс, полученный приемником сигнала, оказывается сильно растянутым во временной области. Наличие модовой дисперсии является недостатком многомодовых систем передачи.

**Поляризационная модовая дисперсия (PMD)** – изменение формы огибающей оптического сигнала, обусловленное различием скоростей распространения двух взаимноперпендикулярных поляризационных модовых составляющих.

Макс потери, дБ/км 0,20 для длины волны 1,55 мкм 0,4 для 1,31 мкм

Числовая апертура 0,13 – 0,14.

Длина волны нулевой дисперсии  $\lambda_0$ , (мкм)

Макс дисперсия поляризованной моды (PMD), пс/нм 1/2

Первое окно прозрачности расположено на длинах волн от 820 до 880 нм и используется в основном для передачи сигналов на короткие расстояния с использованием широкополосных светодиодных источников излучения и коротковолновых лазеров. Основное достоинство такой аппаратуры – ее дешевизна.

Второе окно прозрачности, от 1285 до 1330 нм, активно используется в телекоммуникациях. При относительно высоком затухании оптических сигналов, работающих в этом диапазоне, это окно прозрачности позволяет использовать оптические источники с широкой полосой излучения. Основная причина этого - минимальная величина хроматической дисперсии кварцевого стекла, позволяющая использовать дешевые источники излучения.

Третье окно прозрачности перекрывает диапазон длин волн от 1525 до 1575 нм. Основное достоинство его использования – минимальное затухание оптического сигнала. Однако передача высокоскоростных потоков данных в этом диапазоне сталкивается с обязательным условием компенсации повышенной дисперсии волокна, что ведет к повышению стоимости.

К настоящему времени используются четвертое (1580 нм) и пятое (1400 нм) окна прозрачности, а также оптические волокна, имеющие относительно хорошую прозрачность во всём ближнем инфракрасном диапазоне.

Основные параметры оптического волокна — полоса пропускания. Полоса пропускания — диапазон частот, в пределах которого амплитудно-частотная характеристика оптоволокна достаточно равномерна для того, чтобы обеспечить передачу сигнала без существенного искажения его формы. Так как световой импульс во время распространения по волокну искажается как по амплитуде, так и по длительности, это заметно сказывается на возможностях передачи коротких импульсов на больших битовых скоростях.

Ширина полосы пропускания оптического волокна может быть определена как частота, при которой нормированная передаточная функция равна 0,5 от величины при частоте модуляции 0 Гц. Таким образом, ширина полосы пропускания – это частота модуляции, при которой мощность сигнала падает на 50% или на 3 дБ по отношению к мощности немодулированного сигнала.

### 3. Каналы связи инфокоммуникационных сетей

#### 3.1 Общие принципы уплотнения линий и организации каналов

Пропускная способность (полоса пропускания) линий связи обычно намного выше, чем зачастую требуется для передачи информации от одного источника к получателю. Для повышения эффективности использования линий связи их уплотняют, организуя на линии несколько каналов, т.е. обеспечивают одновременную независимую передачу сигналов многих различных сообщений по паре проводов. **Каналом связи** (виртуальным каналом), называется независимый тракт передачи сигналов от источника к получателю, образованный аппаратурой уплотнения на физической линии путем использования части ресурсов этой линии.

Обобщенная структурная схема аппаратуры уплотнения, представляющей собой многоканальную систему передачи (МСП), изображена на рисунке 3.1.

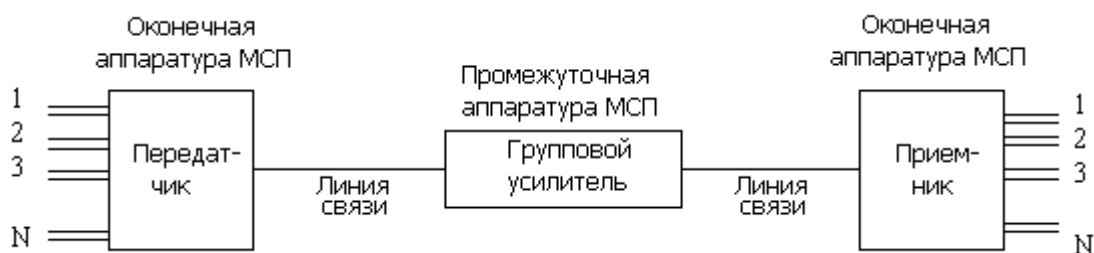


Рисунок 3.1 – Обобщенная структурная схема многоканальной системы передачи

Оконечная передающая аппаратура предназначена для преобразования  $N$  передаваемых исходных сигналов. При этом каждый сигнал должен отличаться от других по одному из параметров (занимаемая полоса частот, время передачи и т.д.). Совокупность таких сигналов, так называемый **групповой сигнал**, передается по линии связи (ЛС). Промежуточное оборудование служит для компенсации затухания и искажений, которые претерпевают сигналы при передаче по ЛС. Оконечная аппаратура осуществляет обратное преобразование группового сигнала в  $N$  исходных.

Существуют системы многоканальной передачи с частотным, временным и спектральным разделением каналов. При частотном разделении каналов для каждого канала выделяется определенная полоса частот  $\Delta F_K$ . Для исключения взаимного влияния между каналами полосы частот каналов разделяются защитными промежутками  $\Delta F_3$  (рисунок 3.2,а). В системах с временным разделением каналов (**ВРК**) для каждого канала выделяется определенный промежуток времени  $\Delta t_K$  (рисунок 3.2,б). Системы со спектральным разделением представляют собой разновидность частотного разделения, при котором по оптической линии передаются несколько лучей одновременно, каждый из которых отличается длиной оптической волны  $\lambda$ .

Частотное разделение так же называют мультиплексирование с разделением по частоте, англ. **FDM** (*Frequency Division Multiplexing*).

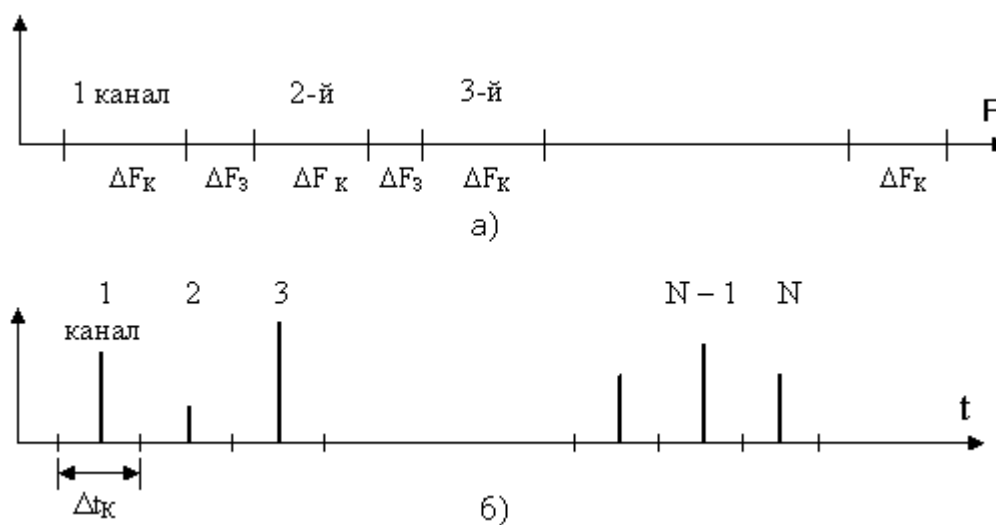


Рисунок 3.2 – Частотное а) и временное б) разделение каналов

## 3.2. Частотное разделение каналов (ЧРК)

### 3.2.1. Преобразование частоты сигналов

Для переноса спектра сигналов исходного сообщения в определенную полосу частот линии связи применяется преобразования частоты. Преобразование сигнала определенной частоты в различные высокочастотные колебания выполняется в модуляторах. Основным элементом любого преобразователя частоты является нелинейный элемент (НЭ),



роль которого выполняет диод или транзистор. Схема простейшего преобразователя частоты показана на рисунке 3.3.

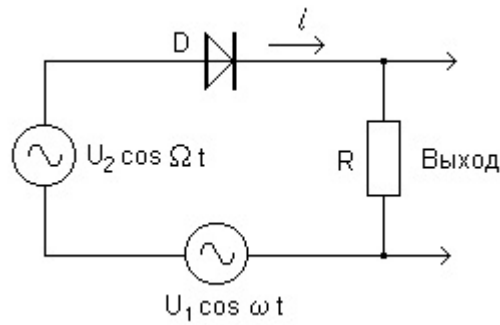


Рисунок 3.3 – Схема простейшего преобразователя частоты

На вход преобразователя подаются два колебания. Напряжение  $U_1 \cos \omega t$  отображает колебание несущего генератора, а напряжение  $U_2 \cos \Omega t$ , - сигнал источника. Роль нелинейного элемента выполняет полупроводниковый диод D.

Ток на выходе нелинейного элемента (диода) в общем случае может быть представлен в виде степенного ряда:

$$i = a_0 + a_1 U + a_2 U^2 + \dots + a_n U^n.$$

Если  $U = U_1 \cos \omega t + U_2 \cos \Omega t$ , то ограничиваясь первыми тремя членами ряда,

$$\begin{aligned} \text{получим: } i &= a_0 + a_1 U_1 \cos \omega t + a_1 U_2 \cos \Omega t + a_2 (U_1 \cos \omega t + U_2 \cos \Omega t)^2 = \\ &= a_0 + a_1 U_1 \cos \omega t + a_1 U_2 \cos \Omega t + a_2 U_1^2 \cos^2 \omega t + 2a_2 U_1 U_2 \cos \omega t \cos \Omega t + \\ &+ a_2 U_2^2 \cos^2 \Omega t = a_0 + a_1 U_1 \cos \omega t + a_1 U_2 \cos \Omega t + a_2 U_1^2 / 2 + \\ &+ (a_2 U_1^2 / 2) \cos 2\omega t + a_2 U_1 U_2 \cos(\omega - \Omega)t + a_2 U_1 U_2 \cos(\omega + \Omega)t + (a_2 U_2^2 / 2) + \\ &+ \cos 2\Omega t + a_2 U_2^2. \end{aligned}$$

При получении этого выражения учитывалось, что

$$\cos^2 \alpha = (1 + \cos 2\alpha) / 2 \quad \text{и} \quad \cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} (\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)).$$

Таким образом, в результате модуляции на выходе НЭ, кроме токов основных частот  $\omega$  и  $\Omega$ , появляются токи с частотами  $2\omega$  и  $2\Omega$ , ...,  $m\omega$  и  $m\Omega$ , а также колебания суммарных и разностных частот  $(\omega + \Omega)$  и  $(\omega - \Omega)$ , так называемые боковые частоты, и боковые частоты, кратные  $(m\omega + n\Omega)$ ,  $(m\omega - n\Omega)$ .

В реальных условиях информационные сигналы состоят не из одной частоты, а занимают определенный спектр (например, для сигналов телефонной связи 0,3 ÷ 3,4 кГц). Поэтому на выходе преобразователя будут не боковые частоты, а боковые полосы частот:

- верхняя  $\omega + (\Omega_1 \div \Omega_n)$ ;
- и нижняя  $\omega - (\Omega_1 \div \Omega_n)$ .

Условно спектр сигнала графически изображают в виде, показанном на рисунке 3.4.

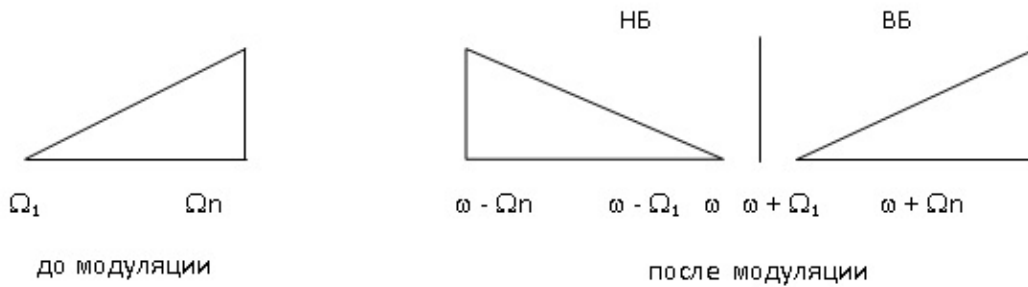


Рисунок 3.4 – Условное изображение спектров сигналов до и после модуляции

Как видно из рисунка 3.4, спектр выходного колебания состоит из нижней (НБ) и верхней (ВБ) боковых полос, каждая из которых содержит колебания исходного сигнала. Поэтому нет необходимости передавать в канал обе боковые составляющие. На практике в аппаратуре уплотнения, с целью экономии полосы частот, осуществляют передачу только нижней или только верхней боковой полосы частот.

Упрощенная схема аппаратуры уплотнения с частотным разделением каналов с передачей одной боковой полосы частот показана на рисунке 3.5. Аппаратура состоит из передающей и приемной частей. В каждой канальной ветви на передающей стороне содержится преобразователь частоты ППер, генератор несущей частоты  $\Gamma$  и полосовой фильтр ПФ, выделяющий одну из боковых полос модулированного сигнала. Несущие частоты в стандартной каналообразующей аппаратуре нижнего уровня имеют значения 108; 104; 100; ...; 68 и 64 кГц. Боковые составляющие отдельных каналов одновременно поступают в линию связи и образуют так называемый групповой сигнал.

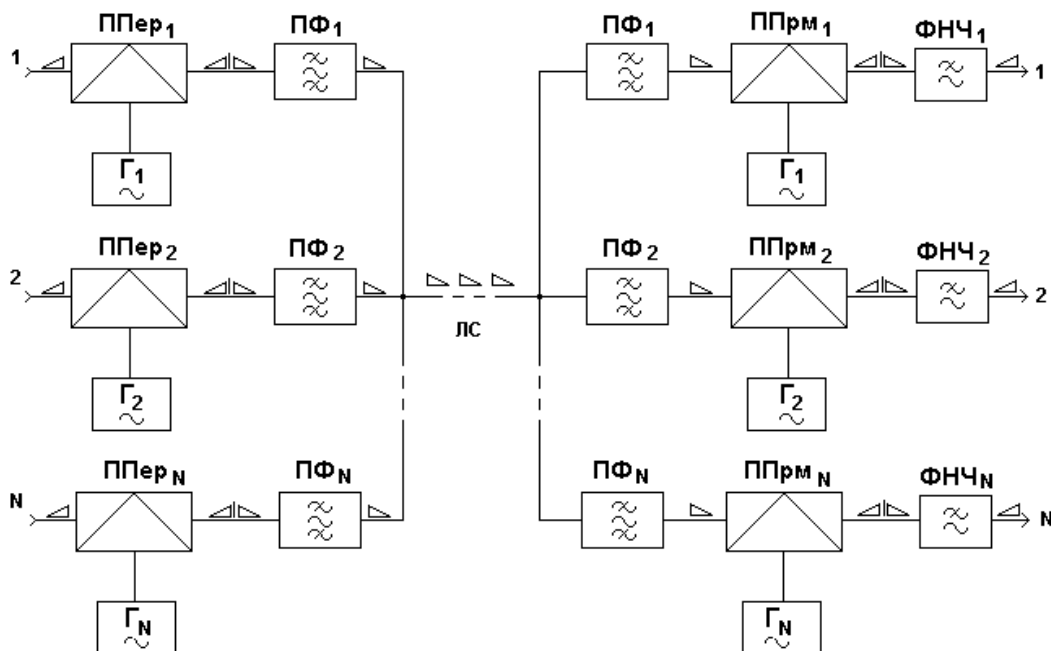


Рисунок 3.5 – Упрощенная схема аппаратуры уплотнения с ЧРК с передачей одной боковой полосы

На приемной стороне каждая канальная ветвь включает полосовой фильтр, выделяющий из группового сигнала свою полосу частот, преобразователь частоты ППрм, в котором производится восстановление несущей и демодуляция сигналов, и фильтр нижних частот, выделяющий из совокупного спектра полосу частот исходного сигнала. Функционирование аппаратуры уплотнения объясняется следующим примером.

При поступлении на вход преобразователей частоты сигналов от источника информации в частотном диапазоне  $0,3 \div 3,4$  кГц после преобразования на выходе Ппер<sub>1</sub> возникнут колебания двух боковых полос:

- ВБ  $108 + (0,3 \div 3,4) = 108,3 \div 111,4$  кГц ; 1 канал
- НБ  $108 - (0,3 \div 3,4) = 104,6 \div 107,7$  кГц ;
  
- ВБ  $104 + (0,3 \div 3,4) = 104,3 \div 107,4$  кГц ; 2 канал
- НБ  $104 - (0,3 \div 3,4) = 100,6 \div 104,7$  кГц ;
  
- ВБ  $100 + (0,3 \div 3,4) = 100,3 \div 103,4$  кГц ; 3 канал
- НБ  $100 - (0,3 \div 3,4) = 96,4 \div 99,7$  кГц .

В линию связи достаточно передавать только одну боковую полосу, т.к. исходный сигнал содержится в обеих полосах.

На приемной стороне после преобразования появляются токи двух боковых полос:

$$\begin{aligned} \text{ВБ } 108 + (104,6 \div 107,7) &= 212,6 \div 215,7 \text{ кГц ;} & 1 \text{ канал} \\ \text{НБ } 108 - (104,6 \div 107,7) &= 0,3 \div 3,4 \text{ кГц.} \end{aligned}$$

Аналогично во втором и третьем канале:

$$\begin{aligned} \text{ВБ } 100 + (96,4 \div 99,7) &= 196,4 \div 199,7 \text{ кГц ;} & 3 \text{ канал} \\ \text{НБ } 100 - (96,4 \div 99,7) &= 0,3 \div 3,4 \text{ кГц.} \end{aligned}$$

Поскольку ФНЧ на выходах преобразователей пропускают только токи нижней боковой полосы  $0,3 \div 3,4$  кГц, на выходах каждого канала сигналы будут иметь ту же полосу тональных частот, какую имели исходные сигналы, т.е.  $0,3 \div 3,4$  кГц.

С целью передачи информации на большие расстояния на линии устанавливаются усилители группового сигнала. Для возможности разделения многоканальных сигналов, передаваемых в прямом и обратном направлениях, используется либо однополосная **четырёхпроводная**, либо **двухполосная двухпроводная** система передачи.

Однополосная четырёхпроводная система используется для организации каналов по парам коаксиальных и симметричных кабелей и требует наличие двух двухпроводных цепей, т.е. двух кабельных пар. По каждой паре в прямом или обратном направлении передаются многоканальные сигналы N каналов. Полосы частот, занимаемые сигналами этих N каналов, в обеих парах совпадают. Для уменьшения переходных влияний между параллельными парами, пары симметричных кабелей, используемые для передачи сиг-

налов в различных направлениях, размещают в двух различных кабелях, т.е. применяют **двухкабельный** способ организации связи. При использовании коаксиальных кабелей применяется **однокабельный** способ организации связи.

### Структурная схема однополосной 4-х проводной аппаратуры уплотнения с ЧРК.

В этой системе первый канал предназначен для передачи телефонных сообщений. Другие КС предназначены как для передачи телефонных, так и не телефонных сигналов, в последнем случае дифференциальные (разделительные) системы к каналам не подключаются. МКС с ЧРК по двухпроводным линиям (в основном воздушным) организуется по двухполосной двухпроводной системе. В этом случае передача в разных направлениях ведется в разных полосах частот. Структурная схема линейной части приведена на рисунке 3.6.

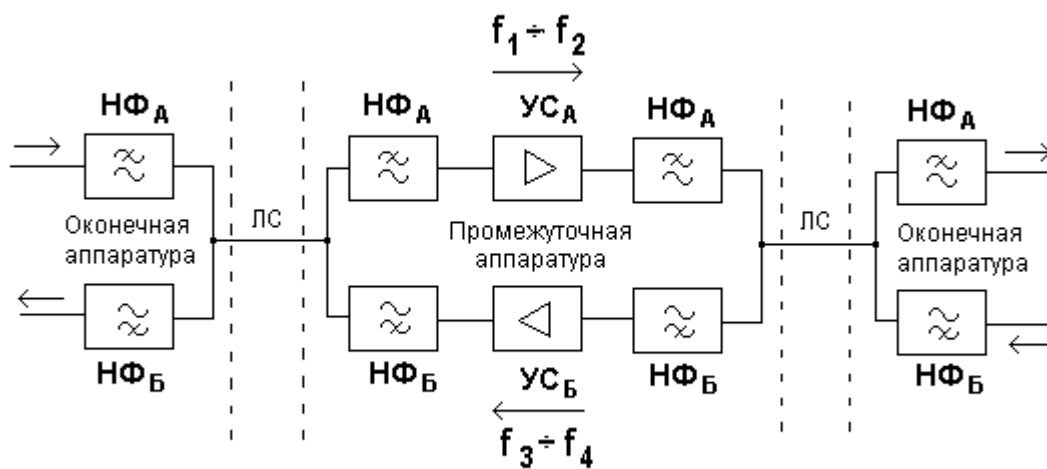


Рисунок 3.6 – Схема линейной части двухпроводной двухполосной аппаратуры с ЧРК

Схема оконечной аппаратуры такая же, как и при 4-х проводной системе, за исключением наличия в 2-х проводной системе направляющих фильтров НФ. В каждой паре НФ один является фильтром нижних частот, а другой – верхних.

Оконечная стандартная аппаратура многоканальных систем передачи с числом каналов 12 и более строится с использованием **принципа многократного преобразования частоты**. Это означает, что в передающей части аппаратуры уплотнения частоты исходных информационных сигналов преобразовываются несколько раз (рисунок 3.7).

Когда количество каналов той или иной группы достигает номинального числа каналов МКС, то последним преобразованием полоса частот этой группы (групп) преобразуется в линейную полосу частот системы, то есть в ту полосу частот, в которой многоканальный сигнал данной системы передается по линии связи.

Использование принципа многократного преобразования частоты позволяет уменьшить число различных узлов, входящих в схему аппаратуры, а также число номиналов несущих частот. Например: при однократном преобразовании 60-канальная МКС должна содержать 60 номиналов частот, фильтров и генераторов. При многократном — лишь 18.



Рисунок 3.7 – Схема многократного преобразования частоты

В настоящее время в системах с ЧРК на нижнем уровне преобразования используется стандартная 12-канальная аппаратура уплотнения. 12-канальная группа исходных сигналов размещается в полосе частот 60-108 кГц. Каждый канал группы имеет отдельный тракт передачи и приема, т.е. каждый из них является 4-х проводным. Структурная схема 12-ти канальной (первичной) группы показана на рисунке 3.8.

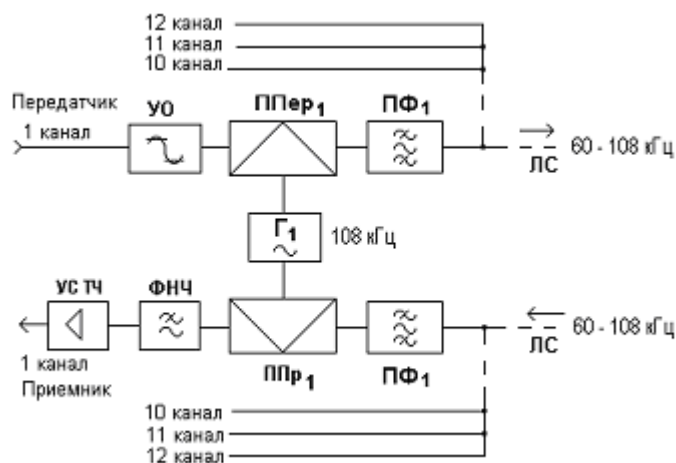


Рисунок 3.8 – Схема стандартного 12-канального блока аппаратуры уплотнения с ЧРК

Несущая частота 1 канала — 108 кГц  
 Разнос частот между каналами — 4 кГц.  
 Несущая частота 12 канала — 64 кГц.  
 Несущая частота N-го канала определяется по следующей формуле:

$$F_{HN} = 108 - 4(N-1) \text{ кГц},$$

где N — номер канала.

Усилитель-ограничитель амплитуды (УО) служит для ограничения пикового напряжения входного сигнала. Усилитель УС ТЧ обеспечивает усиления сигналов тональной частоты.

Это оборудование для формирования общего сигнала 60- и 300-канальных и т.д. групп используется **групповое преобразовательное оборудование**. Схема группового оборудования на 60 каналов показана на рисунке 3.9. Несущие частоты группового оборудования определяются по формуле

$$F_{HN} = 420 + 48(N-1) \text{ кГц},$$

где  $N$  — номер первичного широкополосного канала.

Структурная схема 300-канальной группы аналогичная и отличается только параметрами. Третьичная группа занимает полосу 812-2044 кГц. Между полосами, в которых размещены вторичные группы, имеются защитные промежутки по 8 кГц.

Достоинства частотного разделения каналов состоят в следующем:

- экономное использование полосы пропускания группового канала. Коэффициент использования полосы  $\xi = 0,75 \div 0,8$ ;
- возможность получения большого числа каналов;
- легкость сопряжения проводных и радиорелейных линий;
- возможность объединения нескольких каналов для передачи более широкополосного сигнала.

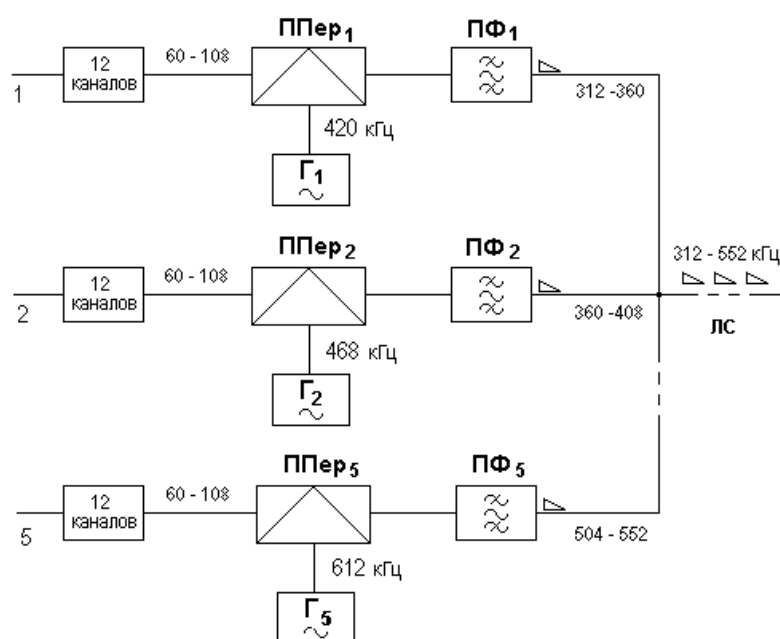


Рисунок 3.9 – Схема группового преобразовательного оборудования

К недостаткам многоканальных систем с ЧРК следует отнести:

- наличие переходных помех, обусловленных нелинейностями АЧХ и ФЧХ группового тракта и возможность накопления этих помех с увеличением числа промежуточных усилительных пунктов;
- резкая чувствительность к загрузке группового тракта;
- сравнительная сложность и громоздкость аппаратуры.

### 3.3. Временное разделение каналов

Принцип временного разделения каналов (**ВРК**) иллюстрируется схемой, представленной на рисунке 3.10,а и временной диаграммой (рисунок 3.10,б).

Основным узлом этих систем являются распределители каналов Р. Для нормальной работы МКС с ВР необходимо обеспечить синхронное и синфазное движение передающего и приемного распределителей. Для этого синхронизирующее устройство (СУ) на каждом цикле посылает в ЛС синхронизирующий импульс (СИ).

Принципиальная возможность ВРК следует из теоремы отсчетов Котельникова. Частота следования импульсов в канале определяется из следующего соотношения:

$$F = N F_T,$$

где  $F_T$  — тактовая частота следования импульсов в одном канале, определяемая по теореме Котельникова

$$F_T = k F_{\text{макс}};$$

$F_{\text{макс}}$  — максимальная частота спектра сигнала источника информации;  $k$  — коэффициент, учитывающий точность воспроизведения сигналов. Обычно  $k = 2,5 \div 4$ .

Период повторения канальных сигналов (импульсов) при этом равен

$$T_{\Pi} = 1 / k F_{\text{макс}}.$$

Для сигналов тональной частоты (ТЧ)  $T_{\Pi} = 1 / 2,5 * 3100 \approx 125 * 10^{-6} \text{ с}$ .

Длительность канальных импульсов  $\tau$  при наличии флуктуационных помех рассчитывается по формуле:

$$F_{\text{макс}} \approx (0,5 \div 0,6) / \tau.$$

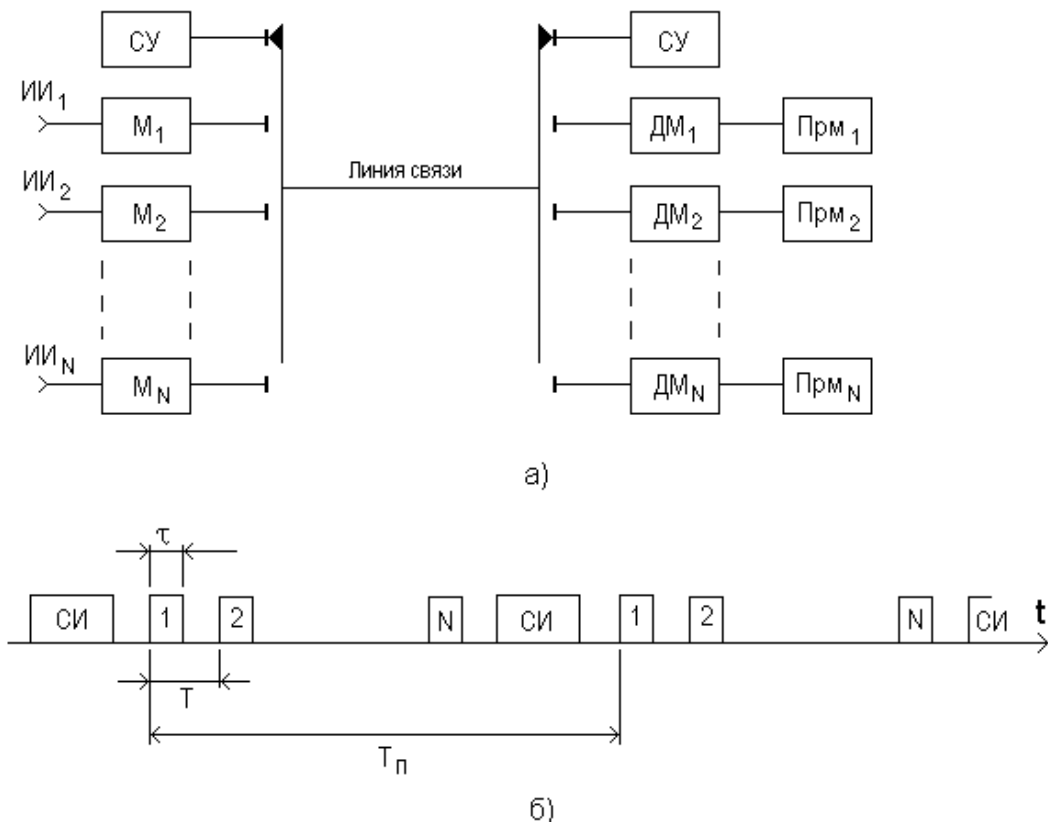


Рисунок 3.10 – Схема (а) и временная диаграмма (б) временного разделения каналов

В электронной МКС с временным разделением вместо распределителей импульсов используются мультиплексоры. Поэтому такие устройства называется также системами с временным мультиплексированием каналов, англ. **TDM** (*Time Division Multiplexing*).

Основными преимуществами МКС с временным разделением являются:

- Высокая достоверность приема информации при применении наиболее помехоустойчивых методов передачи.
- Высокая стабильность остаточного затухания.
- Дешевизна и малые габариты (из-за отсутствия фильтров).

Недостатки МКС с ВР сводятся к следующим:

- Необходимость поддержания синхронной работы коммутаторов.
- Расширение полосы частот системы при уменьшении длительности канальных импульсов, усложнение генерирования импульсов малой длительности.
- Возможность появления взаимных влияний между каналами за счет нелинейности фазовой характеристики.
- Трудность выделения каналов в промежуточных пунктах.

Все разнообразие аппаратуры с ВР можно разделить на две группы:

- 1) Аппаратура с использованием обычных методов модуляции (АИМ, ДИМ и ВИМ);
- 2) Аппаратура с цифровыми методами модуляции (КИМ, ДМ и их разновидности).

Общая структурная схема многоканальной системы с ВРК и с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ) показана на рисунке 3.11. Здесь: ИИ – источник информации; ГТИ – генератор тактовых импульсов; ИМ – импульсный модулятор; ФСИ – формирователь синхронизирующих импульсов; Распределитель КИ – распределитель канальных импульсов; СУ – суммирующее устройство; ССИ – селектор синхроимпульсов; ВС – временной селектор; ДМ – демодулятор.

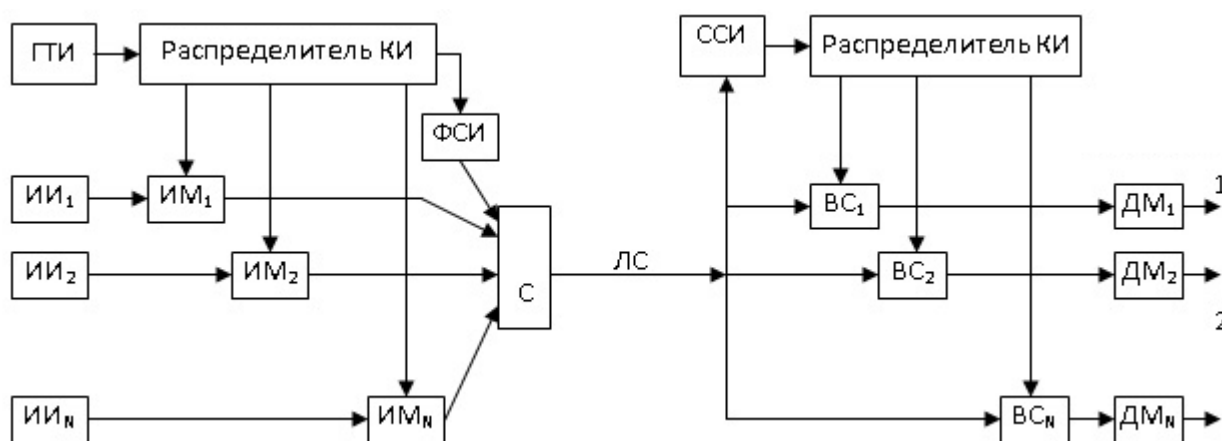


Рисунок 3.11 – Схема аппаратуры уплотнения с ВРК с АИМ

Более перспективной в многоканальной связи является каналообразующая аппаратура с импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ) с использованием цифрового метода передачи, при котором значения отсчетов сигналов преобразуются в цифровую форму с помощью АЦП.



### 3.3.2. Аппаратура уплотнения с ИКМ

Цифровые системы передачи состоят из трех функционально законченных частей: оборудования формирования стандартных цифровых ступеней преобразования (ЦСП), оборудования линейного тракта и вспомогательного оборудования (оборудование дистанционного питания, телемеханики и служебной связи).

В основу построения оборудования систем ИКМ заложена кратность скоростей отдельных ступеней преобразования. Например, для образования вторичной цифровой системы, обеспечивающей скорость передачи 8,448 Мбит/с, необходимо объединить четыре потока первичной системы, обеспечивающей скорость передачи 2,048 Мбит/с. Основные параметры систем ИКМ приведены в таблице 3.1.

На нижнем уровне иерархии аппаратуры уплотнения используется система многоканальной передачи ИКМ-30. Она позволяет организовать 30 каналов ТЧ (плюс 2 канала служебной связи) по двум парам многопарных кабелей типа ТГ или ТПП. Для восстановления затухания и формы сигнала вдоль линий устанавливаются необслуживаемые регенерационные пункты НРП (через 0,35 - 2,7 км).

Таблица 3.1

Тип системы	Скорость передачи, Мбит/с	Число каналов	Направляющая система
Первичная ЦСП (ИКМ-30)	2,048	30	Многопарный НЧ-кабель, РРЛ
Вторичная ВЦСП (ИКМ-120)	8,448	120	Симметричный кабель, коаксиальный кабель, РРЛ, спутниковая линия
Третичная ТЦСП ИКМ-480	≈34	480	Коаксиальный кабель, РРЛ
Четверичная ЧЦСП	≈140	1920	Коаксиальный кабель, световодная и волноводная линии

Можно вместо 30 каналов передачи речевых сообщений использовать часть каналов ТЧ для радиовещания или вести по ним передачу данных со скоростью 64 кбит/с.

Структурная схема аппаратуры ИКМ-30 приведена на рисунке 3.12. В блоке аналого-цифрового оборудования (АЦО) сигналы ТЧ преобразуются в дискретизированные сигналы – АИМ. Эти сигналы передаются на кодер, где они преобразуются в семиразрядные кодовые группы, к которым добавляется еще один разряд для сигналов управления. Сформированный т.о. ИКМ сигнал 32 каналов подается на стойку оборудования линейного тракта (ОЛТ).

Существует два стандарта аппаратуры уплотнения с ИКМ: американский (поток Т1) и европейский – поток Е1. В кадре аппаратуры уплотнения, используемой в США, содержится 24 канальных интервала по 8 бит, что в итоге дает 192 бита на кадр. Один

дополнительный (193-ий) бит используется для целей синхронизации по кадрам (F). Таким образом скорость передачи битов в канале T1 составляет  $193 \times 8000 = 1,554$  Мбит/с. Кадр Европейской аппаратуры уплотнения (канал E1) имеет 32 канальных интервала, а скорость передачи битов в канале составляет  $32 \times 8 \times 8 = 2048$  кбит/с. 8-битовые ИКМ-блоки генерируются каждые 125 мксек (8000/с). Структуры кадров при передаче со скоростью 1,544 и 2,048 Мбит/с показаны на рисунке 3.13.

При передаче голосовых сообщений в потоке T1 все 24 канала являются абонентскими, поэтому управляющая и контрольная информация передается на месте самого младшего бита отсчетов аналогового сигнала. В ранних версиях аппаратуры T1 служебным был 8-й бит каждого байта кадра, поэтому реальная скорость передачи пользовательских данных составляла 56 Кбит/с (обычно восьмой бит отводился под такие служебные данные, как номер вызываемого телефонного абонента, сигнал занятости линии, сигнал снятия трубки и т. п.). Затем технология была улучшена и для служебных целей стали использовать только каждый шестой кадр. Таким образом, в пяти кадрах из шести пользовательские данные представлены всеми восемью битами, а в шестом — только семью.

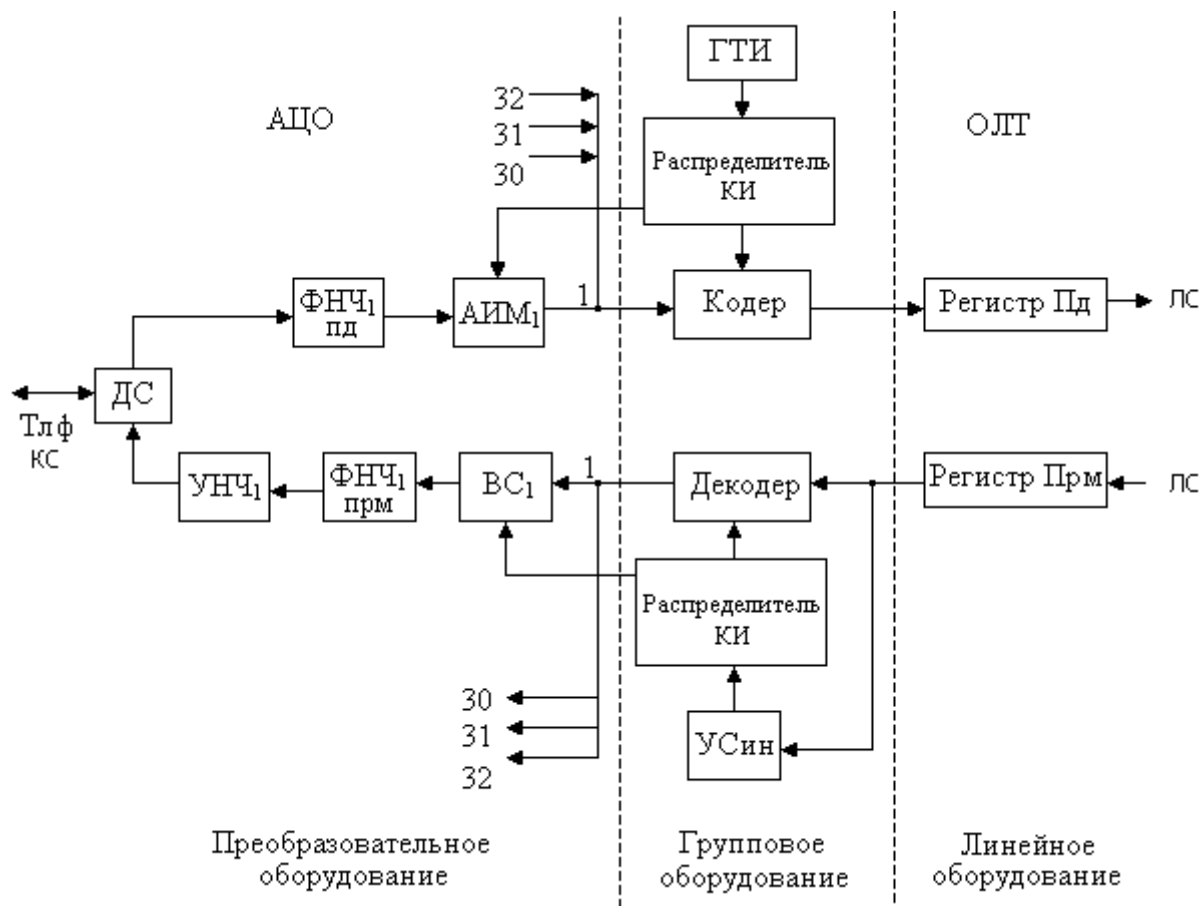


Рисунок 3.12 – Структурная схема аппаратуры ИКМ-30

При передаче компьютерных данных поток T1 предоставляет для пользовательских данных только 23 канала (В-каналы), а 24-й канал (D-канал) отводится для служебных целей, в основном — для восстановления искаженных кадров.

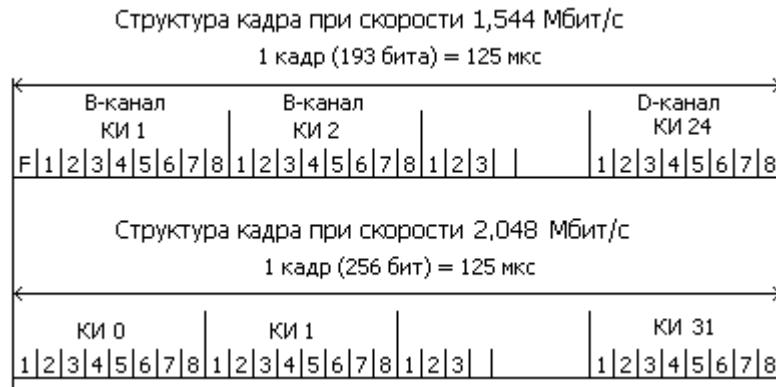


Рисунок 3.13 – Структуры кадров потоков T1 и E1

Для одновременной передачи как голосовых, так и компьютерных данных используются все 24 канала, причем компьютерные данные передаются со скоростью 56 Кбит/с. Восьмые биты применяются для служебных целей.

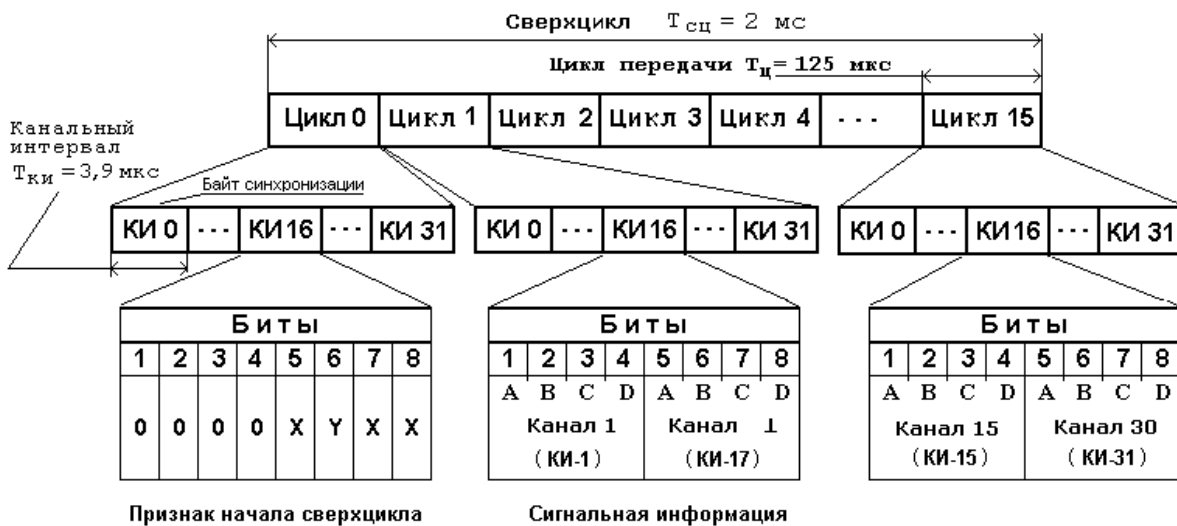


Рисунок 3.14 – Структура сверхциклов сигналов ИКМ-30

Поток E1 (рисунок 3.14) с цикловой структурой предусматривает разделение на 32 основных цифровых канала (ОЦК) со скоростью передачи 64 кбит/с. Канальные интервалы (КИ) обозначаются номерами от 0 до 31 и составляют один цикл длиной  $32 \times 8 = 256$  битов, длительность которого равна 125 мкс. Нулевой канальный интервал (КИ 0) отводится под передачу сигнала цикловой синхронизации FAS (*Frame Alignment Signal*). Эта последовательность представляет собой 7-битовую комбинацию вида 0011011. Восьмой бит предназначен для служебного использования на международных связях. Синхронизирующая комбинация передается только в четных циклах (0, 2, 4 ... 15). В нечетных циклах на месте КИ 0 передается группа служебных битов, используемых для передачи сигналов сетевого управления первичной сети E1, диагностики и контроля ошибок.

Кроме этого, в аппаратуре, формирующей поток E1 дополнительно 16 циклов объединяются в сверхцикл размером 4096 битов и длительностью 2 мс. Нулевой цикл в

шестнадцатом канальном интервале содержит информацию о начале сверхцикла, а остальные 15 интервалов КИ 16 сверхцикла используются для передачи сигнальной информации (см. рисунок 3.14).

К достоинствам и недостаткам ИКМ-систем можно отнести следующие:

Системы ИКМ имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с системами с ЧРК:

- 1) Высокая помехоустойчивость, позволяющая использовать их на линиях с высоким уровнем шумов, где системы с ЧР не работоспособны.
- 2) Качество работы систем не критично к изменению параметров и характеристик каналов связи.
- 3) Отсутствие явления перегрузки группового тракта, т.к. в канале присутствует импульс фиксированной амплитуды, а вероятность появления символов “1” и “0” равна 0,5, независимо от количества занятых каналов.
- 4) Применение регенерации на промежуточных усилительных пунктах позволяет избежать накопления помех и искажений в магистралях большой протяженности
- 5) Элементной базой для построения ИКМ систем является цифровая микроэлектроника.

Основной недостаток ИКМ систем – неэкономичное использование полосы пропускания канала.

### 3.5. Параметры и характеристики каналов связи

Каналом связи (виртуальным каналом) называется тракт передачи сигналов от источника к получателю, образованный каналобразующей аппаратурой (аппаратурой уплотнения) на физической линии связи путем использования части ресурсов этой линии. Для обмена информацией между двумя узлами или между узлом и клиентскими компьютерами используются стандартные каналы связи, различных уровней иерархии, а также кабельные линии городской телефонной сети (ГТС) и собственные электрические и оптические кабели предприятия, на котором развернута компьютерная сеть.

Сигналы, распространяясь по каналам связи, затухают. Для нормальной работы приемной аппаратуры необходимо определенный уровень сигнала. С одной стороны должно быть обеспечено определенное превышение уровней сигналов над помехами, а с другой – уровень должен быть ограничен во избежание перегрузки групповых трактов аппаратуры уплотнения и уменьшения взаимных влияний между соседними цепями кабелей связи. Поэтому уровень является одной из важнейших характеристик каналов связи.

**Уровнем сигнала** называется логарифмическое отношение мощности, напряжения или тока в данной точке цепи к мощности, напряжению или току, которые приняты за исходные. Количественное значение уровней по мощности, напряжению или току определяется в децибелах (дБ) соответственно по формулам:

$$P_M=10\lg P_M/P_0; \quad P_M=20\lg U_X/U_0; \quad P_T=20\lg I_X/I_0;$$

где  $P_x$ ,  $U_x$ ,  $I_x$  – мощность, напряжение и ток в данной точке цепи;  $P_o$ ,  $U_o$ ,  $I_o$  – мощность, напряжение и ток, принятые за исходные.

В зависимости от значений величин, принятых за исходные, различают абсолютный, относительный и измерительный уровни.

**Абсолютным** называют уровень, когда за исходные величины приняты мощность  $P_o = 1$  мВт, напряжение  $U_o = 0,755$  В и ток  $I_o = 1,29$  мА. Значения  $U_o$  и  $I_o$  определены на основе  $P_o = 1$  мВт для величины сопротивления нагрузки  $R_n = 600$  Ом, так как входное и выходное сопротивления большинства устройств связи имеет величину 600 Ом.

**Относительным** называется уровень, определяемый в точке  $x$  системы при значениях  $P_o$ ,  $U_o$ ,  $I_o$ , соответствующих величинам в некоторой другой точке цепи, принятой за исходную.

**Измерительным** уровнем называют абсолютный уровень в какой-либо точке системы при условии, что на ее вход подан сигнал с нулевым уровнем.

Для нормальной работы системы связи устанавливают ограничения на значения уровней сигналов и помех в канале, причем приходится считаться с тем, что вследствие затуханий и усиления, уровни сигнала и помех в различных точках канала будут отличаться. Чтобы избавиться от неопределенности, все нормированные величины относят к точке тракта передачи с нулевым уровнем. Уровни по мощности, отнесенные к точке с нулевым измерительным уровнем, обозначают через **дБм0**. В телефонных каналах связи за точку номинального относительного уровня принимается двухпроводной вход стандартного канала ТЧ, в четырехпроводной части канала ТЧ номинальный относительный уровень передачи телефонных сигналов равен – 13 дБ, а уровень на выходе канала составляет +4 дБ при частоте измерительного сигнала 800 Гц. При передаче дискретных сообщений по телефонным каналам, вследствие большой его загрузки (длительная передача данных), исходящий уровень сигнала при передаче данных для каналов ТЧ устанавливается на 13 или даже на 15 дБ ниже уровня сигнала, чем при телефонной передаче, то есть уровень сигнала ПД в точке А должен быть –15 дБ.

Номинальный уровень на входе широкополосных каналов (первичного, II-го, III-го) составляет –36 дБ, а на выходе –23 дБ, причем частоты измерительных сигналов для широкополосных сигналов соответственно равны 82 кГц, 420 кГц и 1545 кГц.

**Остаточное затухание** канала связи  $a_{ост}$  определяется разностью уровней на входе и выходе каналов

$$a_{ост} = P_{вх} - P_{вых}.$$

Если в канале имеются усилители, то остаточное затухание определяется разностью между суммой всех затуханий  $a_i$  и суммой всех усиления  $S_j$  тракта

$$a_{ост} = \sum_i a_i - \sum_j S_j.$$

**Динамический диапазон** канала  $D_k$  определяется разностью между наибольшим  $P_{max}$  и наименьшим  $P_{min}$  уровнями на входе и на выходе канала.

$$D_k = P_{max} - P_{min} = 10 \lg(P_{max}/P_{min}).$$

Существенное влияние на передачу сигналов оказывают характеристики линий и каналов связи. Существуют несколько характеристик каналов связи. Для непрерывных

(аналоговых) каналов важнейшими характеристиками являются амплитудная, амплитудно-частотная и фазо-частотная.

**Амплитудная характеристика** представляет собой зависимость уровня передачи на выходе канала или его остаточного затухания от величины уровня на входе при фиксированной частоте сигнала. Так, например, для каналов тональной частоты эта зависимость определяется на частоте 800 Гц.

Качество передачи дискретных сигналов зависит от частотных характеристик канала и тем в большей степени, чем выше скорость передачи. К частотным характеристикам непрерывного канала относятся **амплитудно-частотная (АЧХ)** и **фазо-частотная (ФЧХ)**.

АЧХ представляет собой зависимость амплитуды (или уровня) сигнала на выходе канала от частоты сигнала при неизменной амплитуде сигнала на его входе. АЧХ задают обычно частотной характеристикой неравномерности остаточного затухания, которое оценивается отклонением остаточного затухания  $\Delta a_{ост}$  канала от величины, определенной на заданной частоте в полосе пропускания канала (для канала ТЧ принимается частота 800 Гц). Частотная характеристика и допустимые пределы отклонений задаются таблично, либо графически в виде так называемого шаблона. На рисунке 3.15, в качестве примера, показана типовая характеристика неравномерности остаточного затухания  $\Delta a_{ост}$  для стандартного канала тональной частоты (ТЧ).

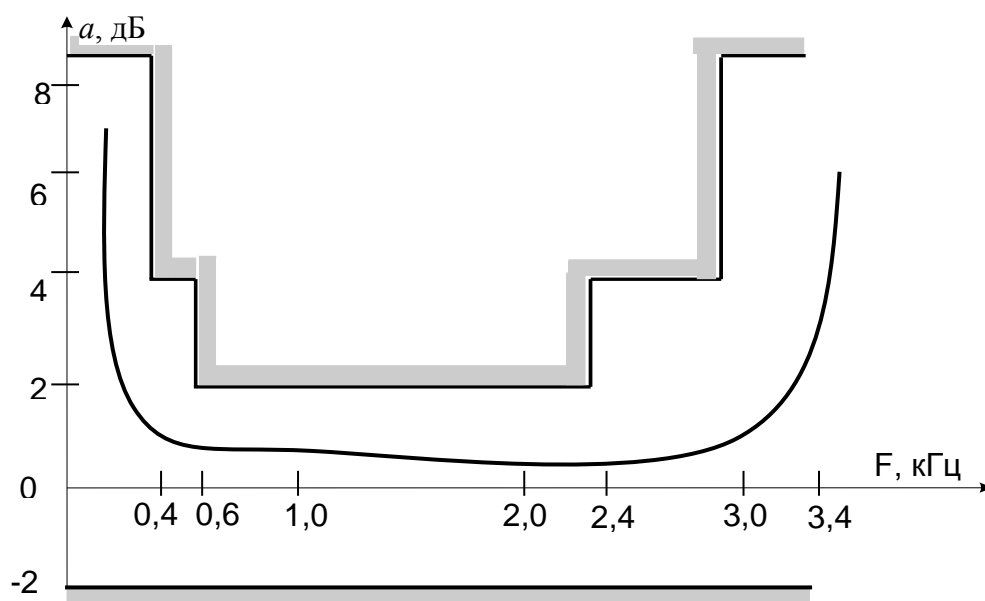


Рисунок 3.15 - Нормы на отклонение остаточного затухания канала ТЧ

Штриховыми линиями (шаблоном) ограничены допустимые пределы изменения  $\Delta a_{ост}$  для одного  $N_n=1$  и пяти  $N_n=5$  переприемных участков канала (транзитов). Согласно рекомендации МККТТ эффективно пропускаемой полосой канала ТЧ называется полоса, неравномерность остаточного затухания которой на крайних частотах не превышает величину 8,7 дБ. Эффективная полоса канала ТЧ 0,3-3,4 кГц, а эффективная полоса пропускания первичного широкополосного канала 60 - 108 кГц.

Для реальных каналов частотная характеристика затухания за счет влияния соединительных линий может существенно отклоняться от допустимых пределов. Неравномерность затухания сигнала на различных частотах искажает амплитудные соотношения спектра передаваемого сигнала, в связи с чем изменяется форма импульса на выходе канала, что затрудняет или делает невозможным их прием. Для уменьшения искажений передаваемых сигналов вводят корректировку АЧХ канала включением амплитудных корректоров (выравнивателей).

В связи с тем, что любой сигнал данных в частотной области представляет собой совокупность гармонических составляющих (см. разделы 4.4-4.5 по спектрам сигналов), то при прохождении сигнала по каналу с неравномерной характеристикой спектральные составляющие сигнала ослабляются по-разному. Поэтому сигнал на выходе канала изменяет свою форму, которая тем сильнее отличается от первоначальной, чем больше неравномерность АЧХ.

Фазочастотная характеристика канала  $\Delta\varphi(f)$  представляет собой зависимость сдвига начальной фазы сигнала  $\Delta\varphi$  на выходе канала по отношению к начальной фазе сигнала на входе от частоты при постоянной амплитуде сигнала на входе. Так как фаза сигнала связана с частотой зависимостью  $\varphi = \omega t$ , то идеальная фазо-частотная характеристика имеет линейный вид. В реальных каналах за счет индуктивности и емкости линии эта зависимость отличается от линейной. Нелинейность ФЧХ приводит к изменениям соотношений между фазами составляющих сигнала, и в конечном итоге к искажению формы сигнала на выходе канала.

Основной характеристикой дискретных каналов является скорость передачи единичных элементов, измеряемая в бит/с. Так для основного цифрового канала скорость передачи равна 64 Кбит/с, для канала E1 – 2048 Кбит/с.

### 3.6. Общая характеристика глобальных телекоммуникационных сетей

Глобальные телекоммуникационные сети служат для объединения региональных, городских и корпоративных сетей, находящихся на значительном удалении друг от друга, либо в различных городах и странах. Хронологически они появились раньше локальных. Глобальные сети очень многое унаследовали от других, гораздо более старых и распространенных сетей связи - телефонных. Так как прокладка высококачественных линий связи на большие расстояния обходится очень дорого, то в первых глобальных сетях использовались уже существующие каналы, изначально предназначенные для других целей. В течение многих лет глобальные сети строились на основе **телефонных каналов тональной частоты**, позволяющих в каждый момент времени вести передачу только одного разговора в аналоговой форме.

Прогресс глобальных компьютерных сетей во многом определялся прогрессом телефонных сетей. С конца 60-х годов XX века в телефонных сетях стала все чаще применяться передача речи в цифровой форме, что привело к появлению высокоскоростных цифровых каналов, соединяющих АТС и позволяющих одновременно передавать по парам проводов десятки и сотни разговоров. Была разработана специальная технология **плезиохронной цифровой иерархии PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy)**. Технология PDH, поддерживала скорости до 140 Мбит/с. Для реализации этой технологии были со-

зданы цифровые системы передачи данных, базирующиеся на многоканальных системах передачи - аппаратуре уплотнения линий связи с импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Сеть, состоящая из многоканальных систем передачи на основе типовых физических линий и каналов, сетевых узлов распределения и коммутации сигналов и предназначенная для доставки сообщений между ее любыми абонентами называется **первичной** сетью. В современных первичных сетях используются цифровые системы передачи, а в качестве линий связи применяются электрические и оптические кабели и линии радиосвязи.

Это способствовало появлению **глобальных цифровых сетей**, которые представляют собой совокупность узлов коммутации и высокоскоростных цифровых каналов связи, расположенных на территории региона (области, страны, континента или всего земного шара), и предназначены для обеспечения услуг связи большому количеству абонентов, расположенных в пределах региона. Глобальные цифровые сети называют также *территориальными* или *региональными* сетями. Англоязычное название глобальной сети – *Wide Area Networks*, сокращенно WAN.

Типичными абонентами глобальной сети являются локальные сети предприятий и корпораций, расположенных в разных городах страны, которым требуется взаимный обмен информацией. Пользоваться услугами сети могут и отдельные компьютеры. Крупные компьютеры класса мейнфрейм обычно обеспечивают доступ к корпоративным данным, в то время как персональные ЭВМ используются для доступа к корпоративным данным и публичной информации Интернет. Глобальные сети характеризуются очень высокой стоимостью, которая обусловлена стоимостью линейных сооружений и узлов коммутации и распределения информации.

Глобальные сети используются преимущественно как транзитная транспортная система, обеспечивающая доставку сообщений между абонентами сети. Такие сети предоставляют в основном услуги трех нижних уровней эталонной модели взаимодействия открытых систем *OSI*. Однако, в последнее время количество услуг верхнего уровня, предоставляемыми глобальными сетями, постоянно растет. Сюда в первую очередь относится доступ к гипертекстовой информации, широкоовещательная рассылка видео- и аудиоинформации и др. В результате глобальные и локальные сети постепенно сближаются за счет взаимопроникновения технологий разных уровней – от транспортных до прикладных.

При создании высокоскоростных сетей передачи данных, речи, видео и мультимедиа в территориальных и крупных корпоративных сетях все чаще применяются *выделенные цифровые каналы* первичной сети связи, созданные на основе новых коммуникационных технологий, таких как **цифровая синхронная иерархия SDH** (*Synchronous Digital Hierarchy*) и технология **плотного волнового мультиплексирования DWDM** (*Dense Wave Division Multiplexing*). SDH расширила диапазон скоростей цифровых каналов до 10 Гбит/с, а технология спектрального мультиплексирования DWDM позволила организовать на оптических линиях связи цифровые каналы со скоростью до сотен гигабит в секунду.

Высокоскоростные цифровые каналы непосредственно соединяют маршрутизаторы, размещаемые на границе локальных сетей отделений предприятий и корпораций. Преимуществом выделенных каналов является гарантированная пропускная способность и минимальная временная задержка. Однако компьютерные сети многих предприятий не в состоянии на 100% загрузить выделяемые им дорогостоящие каналы и владельцы сетей



фактически оплачивают неиспользуемое время.

Проблема недозагрузки каналов может быть устранена путем разделения пропускной способности цифровых каналов первичной сети за счет коммутации каналов или коммутации пакетов. Коммутация каналов была реализована в цифровых сетях интегрального обслуживания ISDN (*Integrated Services Digital Network*), а коммутация пакетов – в сетях с ретрансляцией кадров *Frame Relay* и асинхронных сетях передачи сообщений *ATM* (*Asynchronous Transfer Mode*).

### 3.7. Плезиохронная цифровая иерархия PDH

Первые цифровые сети были разработаны для обеспечения передачи телефонного трафика по высокоскоростным магистральным каналам. В связи с использованием цифровых технологий качество передачи речевых сообщений по телефонным каналам значительно возросло. Существенно снизились затраты на эксплуатацию цифровых телекоммуникационных систем.

В аппаратуре уплотнения с ИКМ речевые сообщения оцифровываются с частотой 8 кГц с использованием 8 битов на отсчет. В результате каждый абонентский канал формирует поток битов со скоростью  $8 \times 8000 = 64$  кбит/с, который поступает на мультиплексор аппаратуры уплотнения. Цифровой канал со скоростью передачи 64 кбит/с назван **основным цифровым каналом**. В первичной цифровой ступени преобразования (ЦСП) многоканальной аппаратуры мультиплексор объединяет битовые потоки группы абонентских каналов в так называемый **кадр** (*frame*), который побитно выдается на выход аппаратуры уплотнения. Групповой поток битов получил название **первичный цифровой поток**. Скорость группового потока зависит от количества объединяемых каналов. В американских и японских системах уплотнения объединяется 24 канала и формируется результирующий **поток Т1**, который кроме 24-х канальных интервалов содержит один бит синхронизации. Таким образом результирующая скорость первичного потока Т1 равняется  $((24 \times 8) + 1) \times 8000 = 1544$  кбит/с.

В европейской системе в первичной ЦСП в кадр объединяется 30 абонентских основных цифровых канала и два служебных. В результате скорость первичного цифрового **потока Е1** составляет  $32 \times 8 \times 8000 = 2048$  кбит/с.

Для обеспечения потребностей в более высоких скоростях передачи образована ступенчатая иерархия скоростей. Чем выше ступень иерархии, тем мощнее цифровой поток, т.е. тем выше его скорость. К системам передачи, стоящим в самом низу иерархической лестницы, относится цифровой поток Т1 североамериканской системы уплотнения и Е1 – европейской. Данные по скоростям передачи для различных систем построения аппаратуры уплотнения приведены в таблице 3.1.

Стандарты построения и группирования каналов в европейских странах несколько отличались от стандартов, принятых в США и в Японии. Иерархия скоростей в цифровых каналах связи, принятая в Европе и в Америке показана на рисунке.3.16. Как видно из рис.3.16, формирование потоков на последующих цифровых ступенях передачи также отличается как по скорости, так и по количеству мультиплексируемых каналов.

Таблица 3.1 – Скорости передачи трех системы цифровой иерархии

Уровень цифровой иерархии	Скорости передач, соответствующие различным системам цифровой иерархии		
	Американская: 1544 кбит/с	Японская: 1544 кбит/с	Европейская: 2048 кбит/с
0	64	64	64
1	1544	1544	2048
2	6312	6312	8448
3	44736	32064	34368
4	---	97728	139264

Изображенная иерархия скоростей при объединении цифровых потоков получила название **плезиохронная цифровая иерархия PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy)**. Скорости цифровых потоков одной и той же ступени иерархии, но образуемых ЦСП, расположенными на различных станциях сети, могут несколько отличаться друг от друга в пределах допустимой нестабильности частот задающих генераторов. Именно поэтому рассматриваемая иерархия ЦСП называется плезиохронной (почти синхронной). Наличие нестабильности задающих генераторов требует принятия специальных мер при объединении исходных потоков в поток более высокой ступени иерархии, что заметно усложняет эксплуатацию первичной сети связи в целом и снижает ее качественные показатели

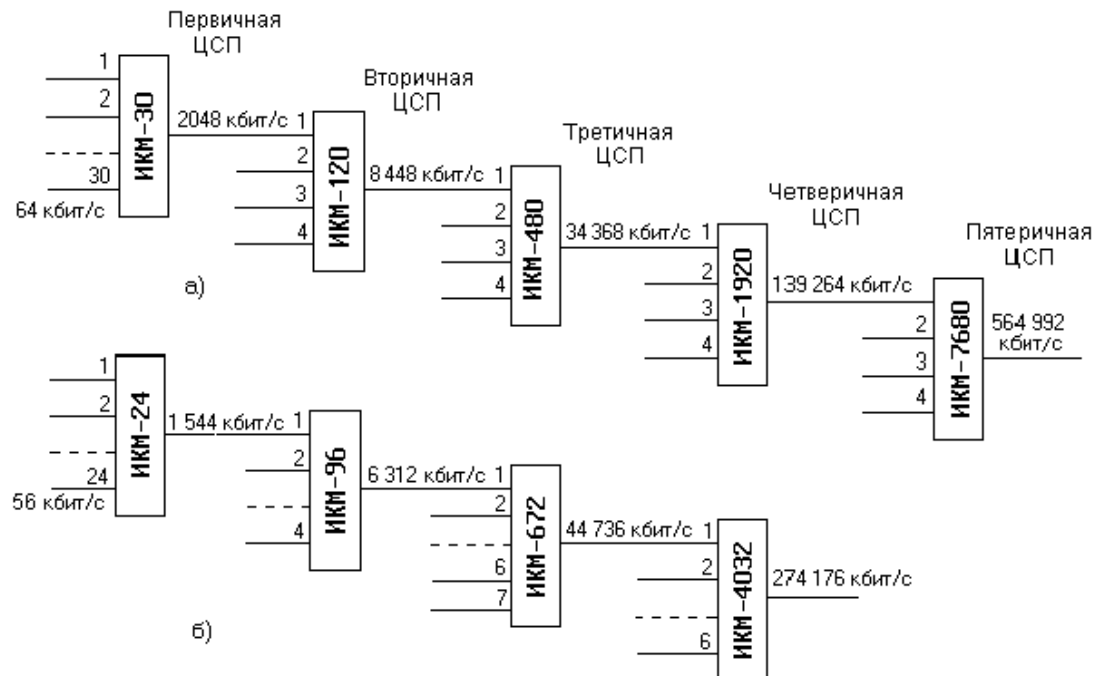


Рисунок 3.16 – Иерархия скоростей передачи в цифровой сети:  
а) европейская и б) американская системы

В связи с тем, что скорости от разных каналов не всегда совпадают, то для синхронизации потоков добавляют нужное число битов в каналы с меньшей скоростью, осу-

ществляя тем самым *выравнивание* скоростей. Такой способ выравнивания получил название *плезиохронного* (почти синхронного) **PDH**.

В плезиохронных цифровых системах передачи (ЦСП) используется принцип временного разделения каналов, поэтому правильное восстановление исходных сигналов на приеме возможно только при синхронной и синфазной работе генераторного оборудования (ГО) на передающей и приемной станциях. Для нормальной работы плезиохронных ЦСП должны быть обеспечены следующие виды синхронизации:

- тактовая синхронизация – поддерживает равенство скоростей обработки цифровых сигналов в линейных и станционных регенераторах, кодеках и других устройствах ЦСП, осуществляющих обработку сигнала с тактовой частотой  $F_T$ ;
- цикловая синхронизация - обеспечивает разделение и декодирование кодовых групп цифрового сигнала и распределение декодированных отсчетов по соответствующим каналам в приемной части аппаратуры;
- сверхцикловая синхронизация - обеспечивает на приеме распределение сигналов управления и взаимодействия (СУВ) по соответствующим телефонным каналам. СУВ представляют собой набор сигналов, управляющих работой АТС (набор номера, ответ, отбой, разъединение и пр.)

Нарушение хотя бы одного из видов синхронизации приводит к потере связи по всем каналам ЦСП.

Технология PDH является достаточно эффективной для цифровой телефонии, однако для передачи данных она оказалась недостаточно гибкой. Она не позволяет извлекать на промежуточных узлах сети потоки данных со скоростью 64 кбит/с или 2 Мбит/с, входящие в групповой поток со скоростью 140 Мбит/с, без полного демультиплексирования и удаления выравнивающих битов. Учитывая недостатки PDH, международный комитет ITU-T принял решение разработать для волоконно-оптических сетей единую синхронную цифровую иерархию SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*). Разработка велась на основе существующей в США аналогичной технологии передачи цифровых сигналов по оптическим линиям, получившая название **SONET** (*Synchronous Optical Network*).

### 3.8. Синхронная цифровая иерархия SDH

**Синхронная цифровая иерархия SDH** (*Synchronous Digital Hierarchy*) - это принцип построения цифровых систем передачи, использующих мультиплексирование цифровых потоков, но со значительно большей базовой скоростью передачи чем в PDH, и синхронизацией всего каналообразующего и передающего оборудования от общего задающего генератора. Технология синхронной цифровой иерархии SDH разработана для создания надежных транспортных сетей, позволяющих гибко формировать цифровые каналы широкого диапазона скоростей — от единиц мегабит до десятков гигабит в секунду. Основная область применения технологии SDH — первичные сети операторов связи. Иногда такие сети строят и крупные предприятия и организации, имеющие разветвленную структуру подразделений и филиалов, покрывающих большую территорию, например, в сетях предприятий энергетического комплекса или железнодорожных ком-

паний.

Каналы SDH относятся к классу полупостоянных. Формирование канала происходит по инициативе оператора сети SDH. Пользователи же лишены такой возможности, в связи с чем каналы SDH обычно применяются для передачи достаточно устойчивых во времени потоков. Из-за полупостоянного характера соединений в технологии SDH чаще используется термин **кросс-коннект** (cross-connect), а не коммутация.

Сети SDH относятся к классу сетей с коммутацией каналов, использующих синхронное мультиплексирование с разделением времени TDM (*Time division Multiplexing*), при котором информация от отдельных абонентов адресуется относительным временным положением внутри составного кадра, а не явным адресом, как это происходит в сетях с коммутацией пакетов. Каналы SDH обычно применяют для объединения большого количество периферийных менее скоростных каналов, работающих по технологии плезиохронной цифровой иерархии. Сети SDH обладают многими достоинствами, главными из которых можно указать следующие:

- *гибкая иерархическая схема* мультиплексирования цифровых потоков разных скоростей. Это позволяет вводить в магистральный канал и выводить из него пользовательскую информацию любого поддерживаемого технологией уровня скорости, не демультиплексируя поток в целом. Схема мультиплексирования стандартизована на международном уровне, что обеспечивает совместимость оборудования разных производителей;
- *высокая устойчивость к отказам сети* за счет автоматической реакции оборудования на такие типичные отказы, как обрыв кабеля, отказ порта, выход из строя мультиплексора или отдельного адаптера связи, направляя трафик по резервному пути или переходя на резервный модуль. Переход на резервный путь происходит очень быстро (обычно в течение 50 мс);
- *мониторинг и управление сетью* на основе информации, встроенной в заголовки кадров;
- *высокое качество транспортного обслуживания* для трафика любого типа — речевого, видео и данных. Техника мультиплексирования с временным разделением каналов, лежащая в основе SDH, обеспечивает трафику каждого абонента гарантированную пропускную способность, а также низкий и фиксированный уровень задержек.

Характерным признаком SDH-иерархии является используемый способ мультиплексирования (рисунок 3.17). Основой (*базисом*) способа мультиплексирования является "**синхронный транспортный модуль STM-1**" (от агл. Synchronous Transport Module) со скоростью передачи 155,52 Мбит/с.

Синхронный транспортный модуль представляет собой кадр, передаваемый со скоростью 155,52 Мбит/с. Каждый STM-1 кадр содержит 2430 байтов, передаваемых каждые 125 мкс. В каждом STM-1-модуле наряду с передачей полезной (пользовательской) информацией со скоростью 150,336 Мбит/с, содержится служебная часть SOH (*Overhead Section*) со скоростью передачи 5,184 Мбит/с. Служебная часть служит непосредственно для обозначения начала временного кадра, указания структуры потока и контроля качества передаваемого сообщения, а также содержит управляющую информацию, обеспечивающую транспортировку STM по сети.

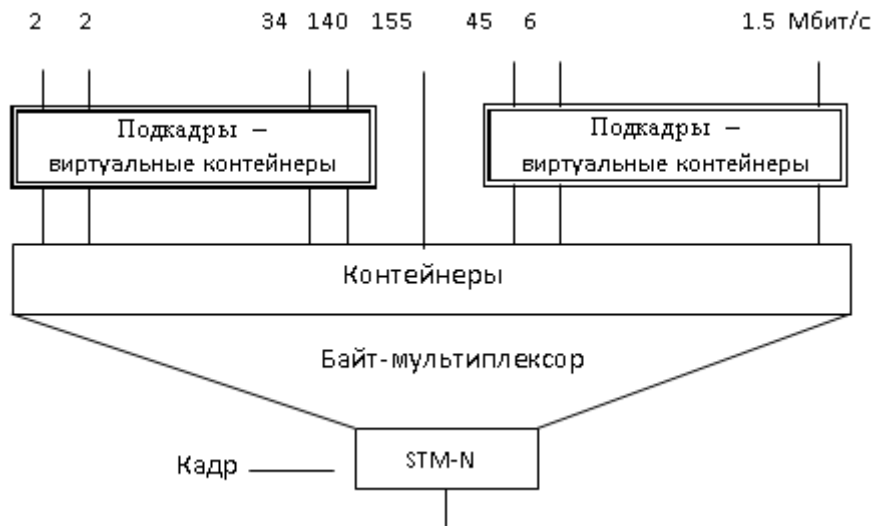


Рисунок 3.17 – Схема мультиплексирования в SDH

В случае битовых скоростей ниже и выше STM-1 - транспортной скорости 155,52 Мбит/с применяются различные способы мультиплексирования. Для скоростей меньших STM-1-скорости пропускная способность STM-1 режима подразделяется иерархически в так называемые контейнеры различной величины. Контейнер представляет собой структуру одного из плезиохронных сигналов (например, поток со скоростью 2,048 Мбит/с). Имеется набор из различных типоразмеров контейнеров (таблица 3.2).

Таблица 3.2 - Параметры типоразмеров контейнеров STM

Обозначение контейнера	Скорость передачи, Мбит/с	Соответствующая скорость PDH, Мбит/с
C 1.1	1,648	1,544
C1,2	2,224	2,048 и 1,544
C2	6,832	6,312
C3	48,384	44,734 и 34,368
C4	149,760	139,264

В каждом контейнере находится управляющий заголовок POH (*Path Overhead*), который позволяет транспортировать данные через узлы SDH-сети. Размеры контейнеров выбраны таким образом, что они подходят для передачи существенно различающихся региональных PDH -сигналов.

В противоположность к PDH в сети SDH возможен селективный доступ к отдельным сигналам без демультиплексирования общего транспортного потока. Это достигается посредством байт-ориентированного мультиплексирования и благодаря непосредственной адресации начала каждого из контейнеров. В контейнере имеются указатели, определяющие текущее положение контейнера в структуре более высокого уровня. Это позволяет мультиплексору находить положение пользовательских данных "на лету", без полного демультиплексирования, как это производится в PDH.

Для скоростей выше 155,52 Мбит/с  $N$  синхронных транспортных модулей мультиплексируются в новый транспортный модуль SDH-N, без ограничения сверху. Так, например, при  $N=4$  транспортная скорость достигает 622,08 Мбит/с, при  $N=16$  она возрастает до 2488,32 Мбит/с.

Во всех иерархических способах мультиплексирования, в том числе в SDH, гибкость битовой скорости и эффективность передачи ограничены, в случае если обслуживаются различные скорости. В частности, полезные сигналы со скоростью, превышающую пропускную способность одного контейнера, должны быть переданы в следующем контейнере. Так, например, поток со скоростью 34 Мбит/с должен быть размещен в контейнере 48 Мбит/с (C3). А это ведет к снижению эффективности использования канала.

Основным функциональным модулем сетей SDH является **синхронный мультиплексор (SMUX)**. Мультиплексоры SDH выполняют как функции собственно мультиплексора, так и функции устройств терминального доступа, позволяя подключать низкоскоростные каналы PDH иерархии непосредственно к своим входным портам. Они являются универсальными и гибкими устройствами, позволяющие кроме мультиплексирования выполнять задачи коммутации, концентрации и регенерации. Это представляется возможным в силу модульной конструкции SDH мультиплексора SMUX, при которой выполняемые функции определяются лишь возможностями системы управления и составом модулей, включенных в спецификацию мультиплексора.

Для построения SDH сетей первых двух уровней SDH-иерархии 155 и 622 Мбит/с наиболее широко используется топология "кольцо" (рисунок 3.18).

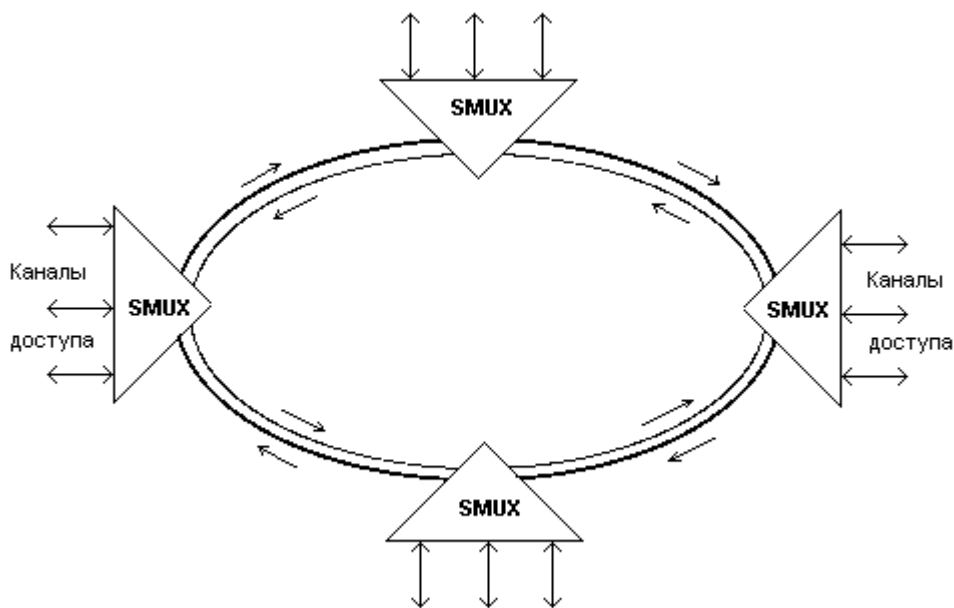


Рисунок 3.18 – Схема построения сети SDH

Основное преимущество этой топологии — легкость организации резервирования типа 1+1 (один основной тракт и один резервный), благодаря наличию в синхронных мультиплексорах SMUX двух пар оптических каналов приема/передачи, дающих возможность формирования двойного кольца со встречными потоками.

### 3.9. Цифровые оптические сети спектрального мультиплексирования WDM

Системы спектрального мультиплексирования **WDM** (*Wave Division Multiplexing*) основаны на способности оптического волокна одновременно передавать свет различных длин волн (цветов) без взаимной интерференции. Каждая длина волны представляет отдельный оптический канал в волоконно-оптической линии связи (ВОЛС). Существуют различные оптические методы для объединения нескольких каналов в одном волокне, а затем выделения их в нужных точках сети. Одна из схем мультиплексирования показана на рисунке 3.19. На входе системы передачи каналные сигналы с помощью призмы объединяются в один групповой сигнал, передаваемый по ВОЛС. На выходе с помощью аналогичной призмы эти сигналы разделяются. Число каналов на входе и выходе может достигать 32, а в отдельных случаях и более.

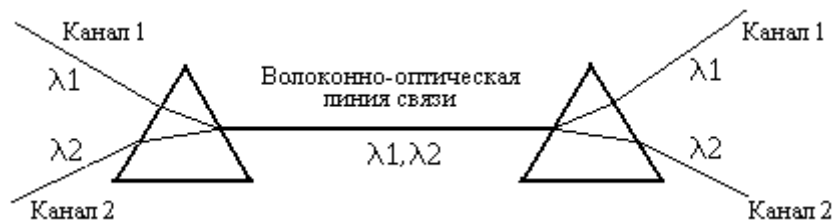


Рисунок 3.19 – Мультиплексирование сигналов с разделением по длине волны

В технологии WDM нет многих ограничений и технологических трудностей, свойственных системам с временным разделением каналов TDM. Для повышения пропускной способности, вместо увеличения скорости передачи в едином составном канале, как это реализовано в технологии TDM, в технологии WDM увеличивают число каналов (длин волн), используемых в системах передачи. Теоретически возможна передача в любом диапазоне длин волн, однако практические ограничения оставляют для использования в системах WDM узкий диапазон в окрестности длины волны 1550 нм. Но даже этот диапазон предоставляет огромные возможности для передачи данных.

Рост пропускной способности при использовании технологии WDM осуществляется без дорогостоящей замены оптического кабеля. Применение технологии WDM позволяет сдавать в аренду не только оптические кабели или волокна, но и отдельные длины волн, то есть реализовать концепцию "виртуального волокна". По одному волокну на разных длинах волн можно одновременно передавать самые разные приложения – кабельное телевидение, телефонию, трафик Интернет, "видео по требованию" и т.д. Как следствие этого, часть волокон в оптическом кабеле можно использовать для резерва. Применение технологии WDM позволяет исключить дополнительную прокладку оптических кабелей в существующей сети.

Первые устройства WDM позволяли передавать по одному волокну от 4 до 16 каналов, каждый из которых поддерживал передачу сигналов синхронной цифровой иерархии SDH/SONET со скоростью 2,5 Гбит/с. На сегодняшний день технология WDM позволяет передавать по одному волокну каналы с разницей длин волн между соседними каналами всего в единицы нанометра (1 нм), что называется плотным волновым мультиплексированием **DWDM** (*Dense WDM*). Развитие технологии DWDM позволило создать коммерческие сети, в которых по отдельным волокнам создаются более сотни независи-

мых оптических каналов, а также сети с передачей сигналов в обоих направлениях в одном и том же оптическом волокне.

Своими успехами технология DWDM во многом обязана достижениям в разработке усилителей на оптическом волокне. В таком усилителе оптические сигналы усиливаются без преобразования в электрические и обратно, что дает возможность создавать сети передачи данных высокой протяженности при значительной экономии электронных компонентов или вообще без них.

Система DWDM структурно во многом похожа на традиционную систему с частотным уплотнением с FDM. Сигналы разных длин волн (частот), генерируемые одним или несколькими оптическими передатчиками, объединяются мультиплексором в многоканальный составной оптический сигнал, который далее распространяется по оптическому волокну. Стандартный частотный интервал между каналами составляет 100 ГГц (около 0,8 нм по длине волны). Имеются предложения по стандартизации частотного плана с расстоянием 50 ГГц (около 0,4 нм) и даже 25 ГГц.

При больших расстояниях передачи на линии связи устанавливается один или несколько оптических повторителей. Демultipлексор принимает составной сигнал, выделяет из него исходные каналы разных длин волн и направляет их на соответствующие фотоприемники. На промежуточных узлах некоторые каналы могут быть добавлены или выделены из составного сигнала посредством мультиплексоров ввода/вывода или устройств кросс-коммутации.

Система DWDM в общем случае состоит из одного или нескольких лазерных передатчиков, мультиплексора, одного или нескольких оптических усилителей, мультиплексоров ввода/вывода, оптического волокна (кабеля), демultipлексора и соответствующего числа фотоприемников, а также электронного оборудования, которое обрабатывает передаваемые данные в соответствии с используемыми протоколами связи, и системы сетевого управления.

На линиях связи большой протяженности в настоящее время используются скорости передачи 2,5 Гбит/с (STM-16) и 10 Гбит/с (STM-64). Скорость передачи в сетях связи городского и регионального масштабов обычно намного меньше.



## 4. Сигналы в системах передачи данных

### 4.1. Общая характеристика и способы модуляции сигналов данных

Сигналом называется некоторая физическая величина (например, электрический ток, электромагнитное поле, звуковые волны и т. п.), отображающая сообщение. Зная закон, связывающий сообщение и сигнал, получатель может выявить содержащиеся в сообщении сведения. Для получателя сообщения сигнал заранее не известен и поэтому он является случайным процессом.

Сигналы в СПД могут отличаться типом переносчика, формой и способом модуляции. Тип переносчика определяется видом канала связи. В каналах с разделением по частоте используются гармонические колебания, а в каналах связи с разделением по времени – последовательность радио- или видеоимпульсов.

Роль модулирующего колебания в процессе модуляции выполняет информационный сигнал, спектр которого необходимо перенести в полосу пропускания канала. В системах передачи данных модулирующим колебанием является последовательность дискретных импульсов. Модулируемым колебанием (несущей) обычно является гармоническое (синусоидальное) колебание. Скачкообразное **изменение** параметров несущего колебания называют также *манипуляцией* или *телеграфией*. Для различения сокращенных обозначений модуляции от манипуляции зачастую амплитудная, частотная и фазовая манипуляция обозначается соответственно АТ (амплитудная телеграфия), ЧТ и ФТ.

На рис.4.1 показаны различные виды манипуляции. На верхнем графике рис.4.1 изображены однополярные информационные сигналы данных, а на втором – соответствующие им биполярные сигналы. На третьем графике показана гармоническая несущая, параметры которой (амплитуда, частота и начальная фаза) не изменяются со временем. На последующих графиках изображены временные диаграммы АМ-, ЧМ- и ФМ-сигналов соответственно. Как видно из диаграмм, изменению значения информационного сигнала соответствует изменение одного из параметров несущего колебания.

Различают абсолютную (ФМ) и относительную (ОФМ) фазовую модуляцию. ОФМ носит также название дифференциальная фазовая модуляция (ДФМ). При абсолютной двухпозиционной фазовой манипуляции (англ. обозначение BPSK - *Binary Phase Shift Keying*) фаза модулированного колебания при значении входного сигнала равного уровню логического "0" совпадает со значением фазы опорного (*несущего*) напряжения ( $\Delta\varphi=0^\circ$ ), а при поступлении "1" – меняется на противоположную ( $\Delta\varphi=180^\circ$ ). То есть, фаза модулированного колебания меняется всякий раз при изменении значения входного сигнала. В случае дифференциальной фазовой манипуляции ДФМ (англ. DPSK - *Differential Phase Shift Keying*), фаза текущего колебания изменяется не по отношению к опорному колебанию, а по отношению к фазе предыдущей посылки.

Из временной диаграммы видно, что скачкообразное изменение фазы модулированного колебания на  $180^\circ$  происходит в случае абсолютной фазовой модуляции при каждом изменении знака модулирующего сигнала, а при относительной (дифференциальной) – каждом единичном значении сигнала данных.

Форма модулирующего сигнала выбирается близкой к прямоугольной. При этом исходят из соображений наибольшего удобства реализации приёмных устройств, обеспе-

чивающих высокую помехоустойчивость. Однако с целью сокращения ширины спектра сигнала в ряде случаев используют сигнал с плавным изменением огибающей.

При передаче дискретной информации по непрерывным каналам связи используются как простые методы модуляции: АМ, ЧМ, ФМ, ДФМ (рис. 4.1), так и комбинированные – одновременное изменение нескольких параметров сигнала (чаще всего амплитуды и фазы).

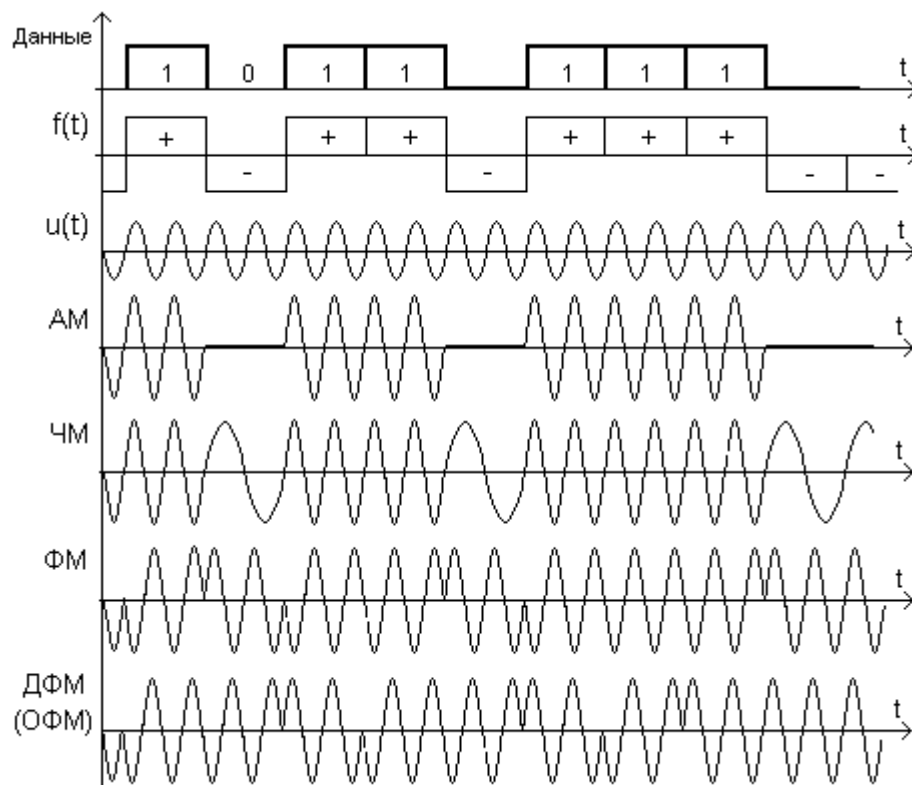


Рисунок 4.1 – Временные диаграммы различных видов манипуляции сигналов

Повышение скорости передачи информации при неизменной скорости модуляции может быть обеспечено за счет увеличения количества значащих позиций модулированного сигнала. Это свойство используется в большинстве современных систем передачи данных. Простейшим вариантом многопозиционной модуляции является двухкратная (4-позиционная) дифференциальная фазо-разностная (относительно-фазовая) манипуляция (ДФМ), при которой модулированный сигнал принимает 4 значения фазы. При 4-позиционной модуляции один элемент сигнала содержит два бита данных. На рис.4.2 изображены векторное и временное представление 4-позиционных ДФМ-сигналов с двумя вариантами значений начальных фаз  $0^\circ$ ;  $90^\circ$ ;  $180^\circ$  и  $270^\circ$ , либо  $45^\circ$ ;  $135^\circ$ ;  $225^\circ$  и  $315^\circ$ . Векторное представление сигналов называют также «сигнальным созвездием». При больших значениях позиций сигналов на сигнальном созвездии изображаются только геометрическое место точек концов векторов.

Формирование ФМ-сигналов со сдвигом фазы на  $180^\circ$  легко осуществляется путем инвертирования колебаний генератора несущей частоты. Для получения модулированных колебаний с числом позиций фаз больше двух используют два колебания, имеющих одинаковую частоту, но сдвинутых по фазе на  $90^\circ$ , т.е. находящихся в квадратуре. В этом случае говорят о так называемой *квадратурной фазовой модуляции (Quadrature Phase*

*Shift Keying, QPSK*).

Модуляция QPSK является частным случаем квадратурной амплитудной модуляции QAM-4, при котором информационный сигнал отображается изменением фазы несущего колебания с шагом  $90^\circ$ .

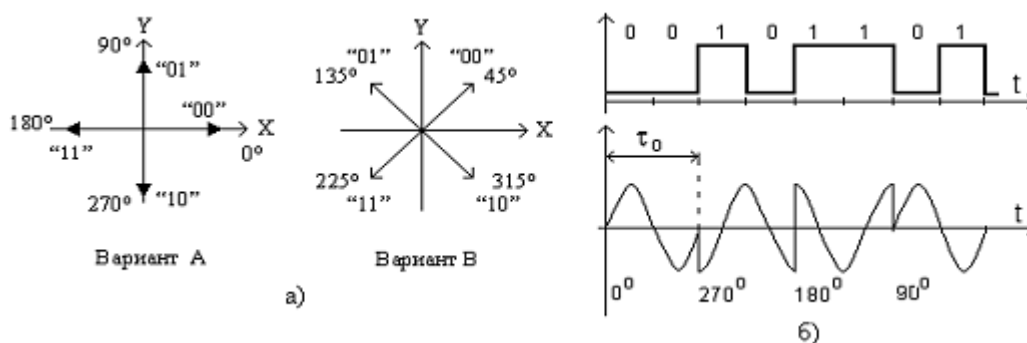


Рисунок 4.2 – Векторные (а) и временные (б) диаграммы 4-позиционной ФРМ

Аналитически QAM-сигнал представляется в виде

$$u_{KAM}(t) = U_m [A(t) \cos \omega_0 t + B(t) \sin \omega_0 t], \quad (4.1)$$

где  $A(t)$  и  $B(t)$  — модулирующие сигналы в квадратурном и синфазном каналах соответственно.

Из формулы видно, что при изменении амплитуд информационных составляющих  $A$  и  $B$  изменяется фаза и амплитуда результирующего сигнала. В передатчике, производящем модуляцию, одна из гармонических составляющих синфазна колебанию генератора несущей частоты, а вторая находится в квадратуре по отношению к этому колебанию (отсюда — квадратурная модуляция). Синфазная составляющая обозначается зачастую как  $I$  (*In Phase*), а квадратурная — как  $Q$  (*Quadrature*). Входной битовый поток преобразуется в кодирующую последовательность  $\{d_k\}$  так, что логическому нулю соответствует кодирующий бит  $+1$ , а логической единице — кодирующий бит  $-1$ . После этого кодирующий поток разделяется на четные и нечетные биты. Четные биты поступают в  $I$ -канал, а нечетные — в  $Q$ -канал. Причем, длительность каждого управляющего импульса  $d_i$  и  $d_q$  в два раза больше длительности единичного элемента сигнала данных  $d_k$ .

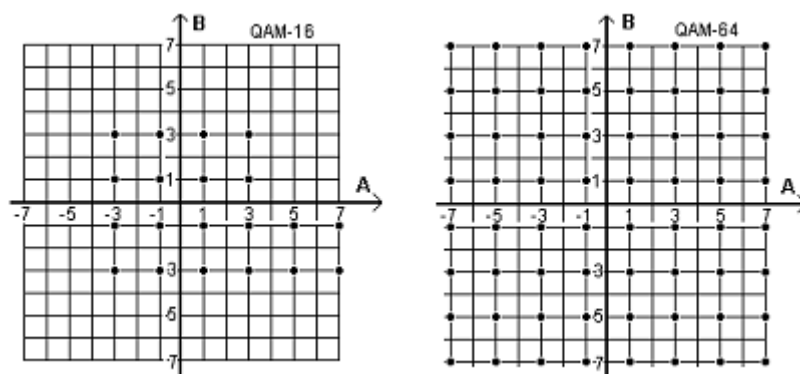


Рисунок 4.3 – Сигнальные созвездия для квадратурной амплитудной манипуляции QAM-16 и QAM-64

На рис.4.3 изображены сигнальные созвездия для QAM-16 и QAM-64 соответственно.

Выбор метода модуляции и формы огибающей должен обеспечивать наибольшую верность и скорость передачи информации с учётом технико-экономической эффективности. Пропускная способность канала связи определяется по формуле Шеннона и зависит от ширины полосы пропускания канала связи  $\Delta F$  и отношения мощности сигнала  $P_c$  и помехи  $P_n$

$$C = \Delta F \log_2 (1 + P_c / P_n) \text{ бит/с.}$$

Отсюда вытекает задача: выбрать такой сигнал и способ модуляции, чтобы ширина спектра сигнала не превышала величины  $\Delta F$  канала. Поэтому в СПД столь подробно рассматривают спектры различных сигналов.

## 4.2 Способы передачи дискретных сигналов

При передаче дискретных сообщений каждый элемент кодовой комбинации передается отрезком сигнала определенной длительности  $\tau_0$ , который называется единичным элементом (е.э.) или посылкой. Длительность е.э.  $\tau_0$  называется единичным интервалом (е.и.). Различают два основных способа передачи е.э.: асинхронный и синхронный. При асинхронном способе передача каждого е.э. осуществляется в случайные моменты времени, поэтому на приемной стороне не представляется возможным прогнозировать моменты приема очередных е.э. Примером асинхронного способа передачи является простейшая схема телеграфирования аппаратом Морзе (рис.4.3).

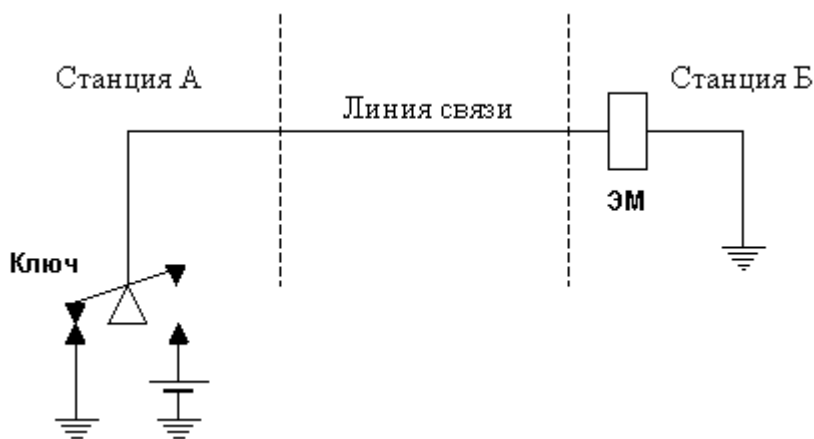


Рисунок 4.3 – Схема асинхронной передачи единичных элементов

Для регистрации того или иного е.э. на приеме используется фиксация начала токовой или бестоковой посылки. Этот способ сильно подвержен действию помех. В СПД для повышения верности приема е.э. при наличии искажений применяют методы, основанные на рациональном выборе момента регистрации принимаемых элементов. Необходимым условием использования таких является знание моментов прихода е.э. в приемник.

При *синхронном* способе передачи е.э. передаются через одинаковые промежутки времени и имеют фиксированную длительность. Таким образом, на приемной стороне можно прогнозировать моменты прихода е.э. и применять методы регистрации, обеспечивающие повышение верности приема.

Способ передачи может быть последовательный и параллельный. При последовательном способе передача е.э. осуществляется последовательно во времени, один за другим. При параллельном - все разряды кодовой комбинации или их часть передаются одновременно. Для реализации последовательного способа в передатчике и приемнике необходимо иметь распределители, которые вращаются с одинаковой скоростью. Такой режим работы называется синхронным. Чтобы посылки с  $i$ -го контакта передающего распределителя попали на  $i$ -й контакт приемного распределителя необходимо поддержание определенного соотношения фаз, т.е. обеспечивать синфазность. Таким образом, для обеспечения полного соответствия принятых кодовых комбинаций переданным, распределители должны переключаться синхронно и синфазно.

Применяют два основных метода фазирования: **синхронный** и **старт-стопный**. При синхронном методе фазирования распределители после установления связи работают непрерывно, и, следовательно, на приемной стороне непрерывно формируются управляющие импульсы независимо от того, передается информация или нет. Для поддержания синхронности и синфазности предусматриваются специальные фазирующие устройства.

При старт-стопном методе фазирования в промежутках между передачей сообщений передающий и приемный распределители не работают (стоят на стопе). Перед сигналом передачи сообщений передается сигнал начала передачи «старт», под воздействием которого оба распределителя начинают синфазно переключаться в течение передачи одной кодовой комбинации. По окончании передачи символа оба распределителя останавливаются «на стопе». При этом расхождение по фазе, накопившееся за время передачи кодовой комбинации, ликвидируется.

### 4.3. Временные и энергетические характеристики дискретных сигналов

К временным параметрам сигнала относится длительность единичного элемента  $\tau_0$ , для периодической последовательности единичных элементов – период  $T$  и скважность  $\alpha = T/\tau_0$  (рисунок 4.4). Количество единичных элементов  $B$ , передаваемых в единицу времени, называется скоростью манипуляции. Эта величина получила размерность Бод.

$$B = 1/\tau_0. \quad (4.1)$$

Частота периодической последовательности со скважностью  $\alpha$  связана со скоростью манипуляции следующим соотношением:  $F = 1/T = 1/\alpha\tau_0 = B/\alpha$ .

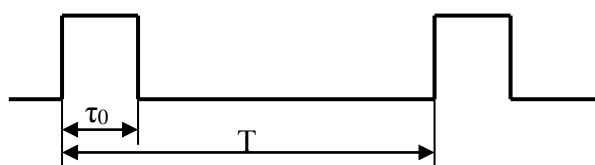


Рисунок 4.4 – Периодическая последовательность прямоугольных импульсов

В системах передачи данных периодическую последовательность импульсов (е. э.) записывают в виде  $\tau_0 : (T - \tau_0)$  или  $1 : (\alpha - 1)$ . На рис.4.5 и показаны последовательности вида 1:1 (а) и 1:3 (б).

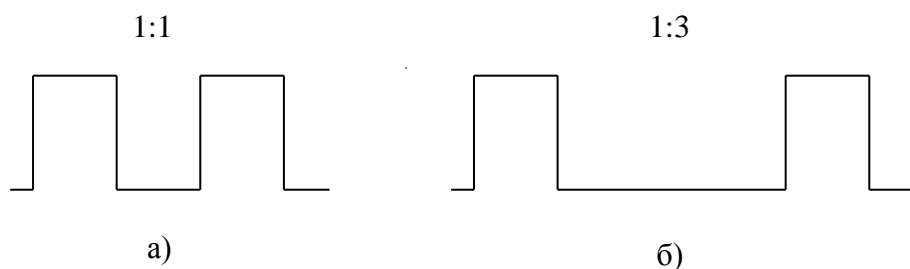


Рисунок 4.5 – Пример периодических последовательностей

К энергетическим параметрам сигналов относится мощность  $P_C$  и энергия  $E_C$  сигнала, определяемые соответственно по формулам:

$$P_C = U_{\text{эф}}^2 / R ; \quad \text{при } R=1 \text{ Ом} \quad P_C = U_{\text{эф}}^2 ;$$

$$E_C = \int_0^{\tau_0} U_{\text{эф}}^2 dt = U_{\text{эф}}^2 \tau_0 \quad (\text{на единичном сопротивлении}).$$

#### 4.4. Спектры импульсов постоянного тока

##### 4.4.1. Спектры немодулированных сигналов передачи данных

Сигналы постоянного тока широко используются при передаче данных по кабельным линиям связи. При этом используются однополярные двоичные или биполярные двоичные и квазитроичные импульсы. Любой сложный периодический сигнал можно разложить в ряд Фурье по гармоническим составляющим, т.е. представить его в виде суммы гармонических колебаний с частотами, кратными частоте повторения этого сигнала:

$$u(t) = C_0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos(k\Omega t - \varphi_k), \quad (4.2)$$

где  $u(t)$  — разлагаемый периодический сигнал;  $k$  — номера гармоник ( $k = 1, 2, \dots$ );  $C_0$  — постоянная составляющая;  $C_k$  — амплитуды гармоник;  $\varphi_k$  — начальные фазы гармоник;  $\Omega$  — круговая частота повторения равная  $2\pi/T$ , здесь  $T$  — период повторения функции  $u(t)$ . Частота первой гармоники очевидно равна  $F=1/T$ .

Совокупность амплитуд  $C_k$  и  $C_0$  называют спектром амплитуд (или просто спектром), а совокупность фаз  $\varphi_k$  — фазовым спектром. Амплитуды гармоник вычисляются по формуле

$$C_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad (4.3)$$

$$\text{где } a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u(t) \cos k\Omega t dt, \quad b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u(t) \sin k\Omega t dt. \quad (4.4)$$

Постоянная составляющая вычисляется по формуле

$$C_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u(t) dt. \quad (4.5)$$

Интегралы в этих формулах легко вычисляются. Если функция непериодическая, то она может быть представлена интегралом Фурье

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (4.6)$$

где комплексный спектр равен

$$S(\omega) = |S(\omega)| e^{-j\varphi(\omega)}, \quad (4.7)$$

где  $|S(\omega)|$  - спектральная плотность амплитуд;  $\varphi(\omega)$  - спектр фаз.

Как видно из вышеприведенных выражений, в непериодической функции расстояние между соседними гармониками становится бесконечно малым, т.е. спектр становится сплошным. В отличие от него спектр периодической функции является линейчатым или дискретным.

Рассмотрим спектры некоторых типичных непериодических (одиночных) сигналов. Немодулированные сигналы в СПД обычно состоят из прямоугольных импульсов длительностью  $\tau_0$  (рисунок 4.6,а).

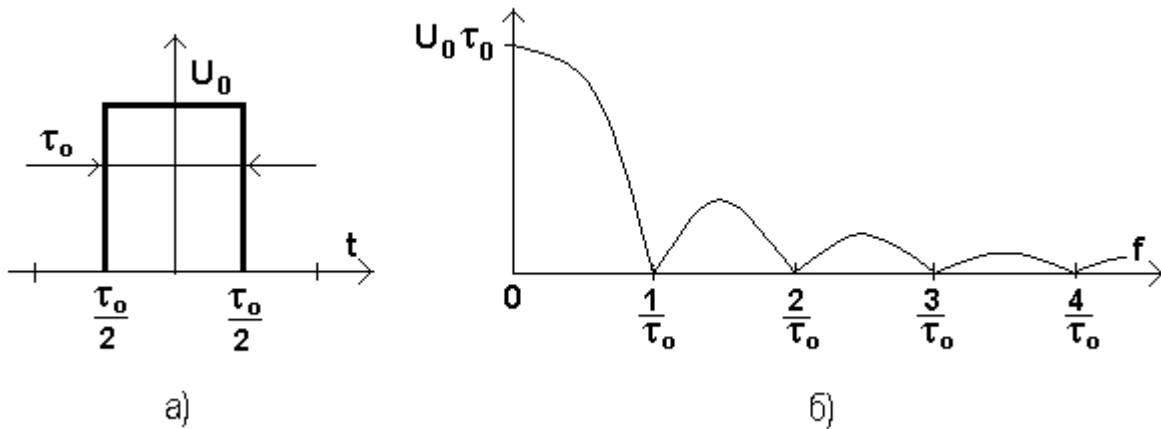


Рисунок 4.6 – Одиночный прямоугольный импульс (а) и его спектр (б)

На основании формулы преобразования Фурье получим:

$$S(\omega) = U_0 \int_{-\tau_0/2}^{\tau_0/2} e^{-j\omega t} dt = U_0 \tau_0 \left| \frac{\sin \pi \tau_0 f}{\pi \tau_0 f} \right|, \quad (4.8)$$

где  $U_0$ -амплитуда импульса,  $f=\omega/2\pi$ -текущая частота.

Если импульс данных имеет трапецеидальную форму (рисунок 4.7,а), то спектральная плотность для одиночного импульса рассчитывается по формуле:

$$S(\omega) = U_0 \tau_0 \left| \frac{\sin \pi \tau_0 f}{\pi \tau_0 f} \cdot \frac{\sin \pi \tau_H f}{\pi \tau_H f} \right|.$$

Графическая зависимость спектральной плотности при различных длительностях нарастания времени фронта импульса показана на рис.4.7,б. Из рисунка видно, что чем медленнее нарастает импульс, тем меньше энергии содержится в верхних лепестках спектра, и тем больше энергия основного лепестка.

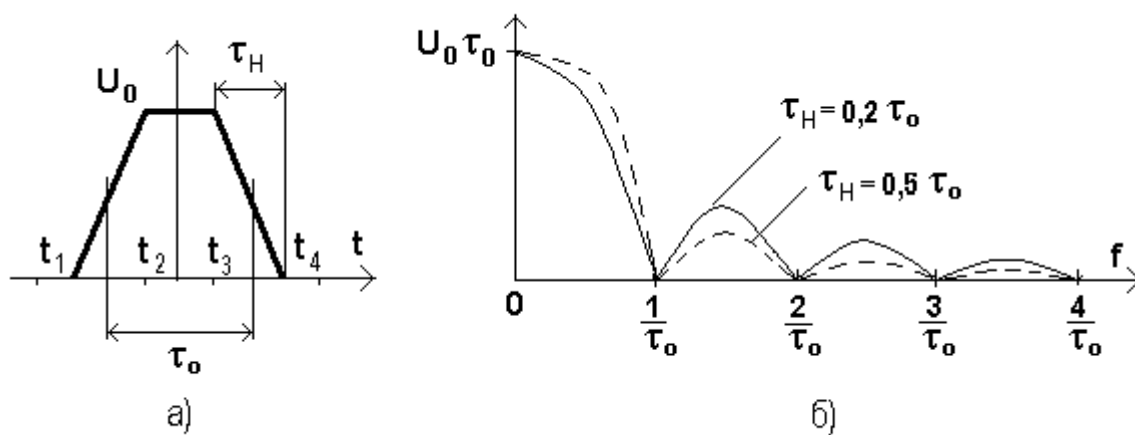


Рисунок 4.7 – Трапецеидальный импульс (а) и его спектр (б)

Для косинусоидального импульса (рисунок 4.8,а) с длительностью  $\tau_0$  на середине его высоты спектральная плотность рассчитывается по следующей формуле:

$$S(\omega) = \left| \frac{U_0 \tau_0}{1 - 4(\tau_0 f)^2} \cdot \frac{\sin 2\pi \tau_0 f}{2\pi \tau_0 f} \right|.$$

Вид спектра косинусоидального импульса показан на рисунке 4.8,б.

Аналогично определяются спектры для экспоненциального, колоколообразного и других форм импульсов. Следует отметить, что для всех рассмотренных импульсов спектры характеризуются одним и тем же: основная энергия сосредоточена вблизи нулевой частоты; при увеличении частоты амплитуда составляющих падает. В принципе, все рассмотренные спектры бесконечно широкие, однако можно говорить о конечной ширине спектра импульса, если отсечь высокие частоты, на которых расположена незначительная часть энергии, например, 1% энергии сигнала. Практически под шириной спектра понимают область частот, в пределах которой сконцентрировано 90% или 95% энергии.



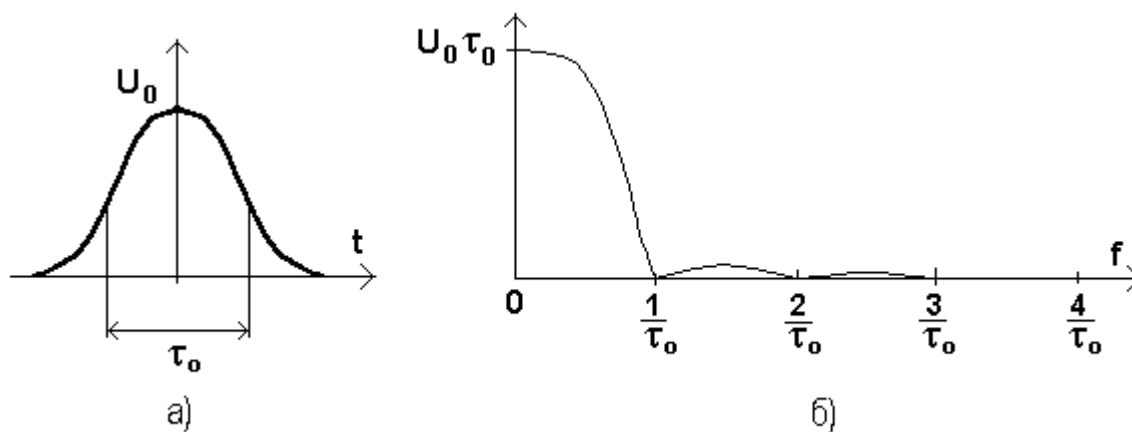


Рисунок 4.8 – Косинусоидальный импульс (а) и его спектр (б)

Рассмотрим спектр периодической последовательности прямоугольных импульсов типа “точки”, т.е. сигнала вида 1:1 (рис.4.9). Поскольку сигнал является четной функцией времени, то в (4.4) обращаются в нуль все  $b_k$ . Используя формулы (4.4) и (4.5), получим

$$C_k = |a_k| = \left| \frac{2}{T} \int_{-\tau_0/2}^{\tau_0/2} U_0 \cos k\Omega t dt \right| = U_0 \left| \frac{\sin \frac{\pi k}{2}}{\frac{\pi k}{2}} \right|. \quad (4.9)$$

$$C_0 = \frac{1}{T} \int_{-\tau_0/2}^{\tau_0/2} U_0 dt = \frac{U_0}{2}. \quad (4.10)$$

Здесь  $\tau_0$  – длительность единичного интервала сигнала.

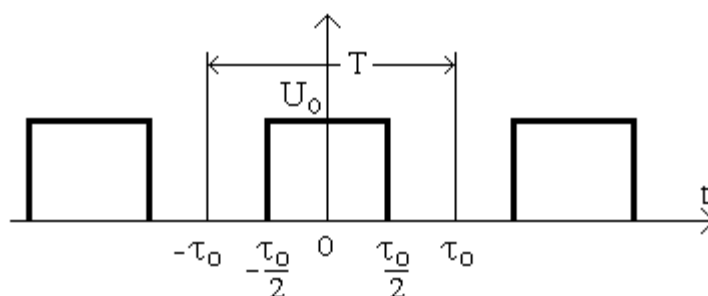


Рисунок 4.9 – Импульсная последовательность вида 1:1 - «точки»

Спектр “точек” показан на рисунке 4.10. Постоянная составляющая равна  $U_0/2$ . Основную энергию содержит первая гармоника, а все четные гармоники отсутствуют. Частота основной (первой) гармоники  $F=1/T=1/(\alpha\tau_0)$ , остальные частоты кратны частоте первой гармоники.

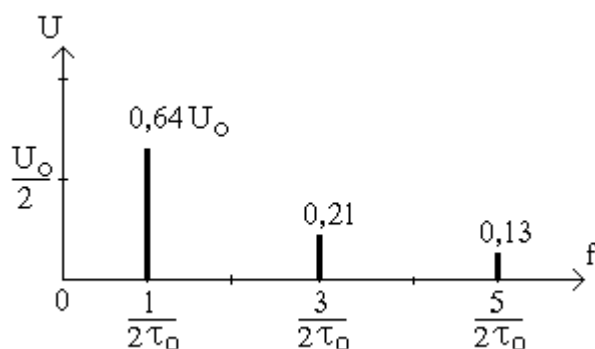


Рисунок 4.10 — Спектр сигналов типа «точки»

#### 4.4.2 Спектры видесигналов типа 1:( $\alpha-1$ )

Рассмотрим теперь спектр импульсной последовательности вида 1: ( $\alpha-1$ ), где  $\alpha=T/\tau_0$  — скважность последовательности. Этот сигнал также является четной функцией и поэтому все коэффициенты  $b_k$  обращаются в нуль. Амплитуды гармоник будут равны:

$$C_k = |a_k| = \left| \frac{2}{T} \int_{-\tau_0/2}^{\tau_0/2} U_0 \cos k\Omega t dt \right| = \frac{2U_0}{\alpha} \left| \frac{\sin \frac{\pi k}{\alpha}}{\frac{\pi k}{\alpha}} \right|, \quad (4.11)$$

а постоянная составляющая  $C_0 = U_0 / \alpha$ .

Пусть  $\alpha = 6$ , тогда импульсная последовательность имеет вид 1:5 (рис.4.11), а спектральные составляющие соответственно равны:

$$C_k = \frac{U_0}{3} \left| \frac{\sin(\pi k / 6)}{\pi k / 6} \right|; \quad C_0 = U_0 / 6. \quad (4.12)$$

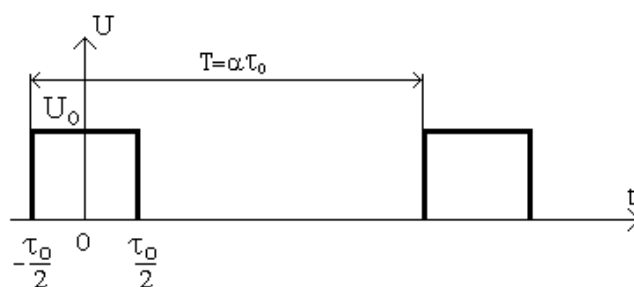


Рисунок 4.11 – Импульсная последовательность вида 1:5

Спектр этого сигнала показан на рисунке 4.12. По сравнению со спектром сигнала 1:1 спектр сигнала 1:5 гораздо сложнее. На участке от нуля до частоты  $1/\tau_0$  теперь располагается 5 гармоник. Вследствие увеличения количества гармоник амплитуда каждой из них уменьшилась.

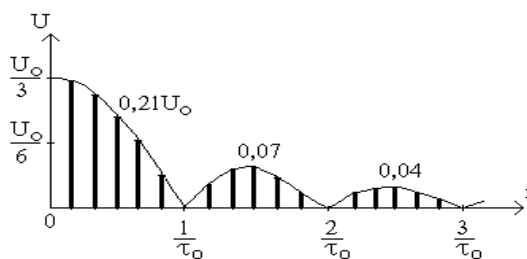


Рисунок 4.12 – Спектр импульсной последовательности вида 1:5

Рассмотрения этого частного случая и общей формулы (11) позволяет сформулировать следующие закономерности спектра последовательности прямоугольных импульсов вида 1: ( $\alpha-1$ ):

1. Амплитуда спектральных составляющих спадает по закону функции  $|\sin x / x|$ .
2. Амплитуда спектральных составляющих обращается в нуль на частотах  $1/\tau_0$ ,  $2/\tau_0$ ,  $3/\tau_0$  и т.д.
3. В основной области частот от нуля до  $1/\tau_0$  располагается  $\alpha-1$  гармоник через равные промежутки  $1/(\alpha\tau_0)$ . Частота первой гармоники равна  $1/(\alpha\tau_0) = B/\alpha$  Гц.
4. Постоянная составляющая (компонента с нулевой частотой) равна:  $C_0 = U_0/\alpha$ .
5. Амплитуда гармоник при уменьшении частоты стремится к величине  $2C_0$ .

## 4.5 Спектры дискретных модулированных сигналов

Немодулируемое гармоническое (несущее) колебание представляется в виде:

$$U = U_M \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (4.13)$$

где  $U_M$  — амплитуда напряжения несущего колебания,  $\omega_0$  — его круговая частота,  $\varphi_0$  — его начальная фаза.

При *амплитудной модуляции* модулирующий сигнал изменяется по произвольному закону  $f(t)$ , причем предполагается, что максимальное и минимальное значение амплитуды равны соответственно:  $\Delta U_{\text{МАКС}} = +1$  и  $\Delta U_{\text{МИН}} = -1$ . Если амплитуду модулирующего напряжения обозначить  $\Delta U$ , то амплитуда модулированного напряжения будет изменяться по закону

$$U_1 = U_M + \Delta U f(t) = U_M \left[ 1 + \frac{\Delta U}{U_M} f(t) \right] = U_M [1 + m f(t)], \quad (4.14)$$

где  $m$  — коэффициент модуляции ( $m = \Delta U / U_M$ ). Модулированный сигнал запишется следующим образом:

$$U_{AM} = U_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = U_M [1 + m f(t)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (4.15)$$

Для наиболее часто применяемой стопроцентной модуляции ( $m=1$ ):

$$U_{AM} = U_M [1 + f(t)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (4.16)$$

Здесь и в дальнейшем мы будем рассматривать спектры модулированных колебаний в двух случаях: когда  $f(t)$  представляет периодическую последовательность прямоугольных посылок и когда  $f(t)$  является гармоническим колебанием. Первый случай амплитудной модуляции получил название *двоичной амплитудной модуляции*. В общем случае манипуляции  $f(t)$  может принимать конечное число значений. Первый случай соответствует процессам, имеющим место в системах передачи дискретной информации, а второй позволяет путем сравнения с первым сделать ряд полезных выводов.

Для определения спектра  $U_{AM}$  достаточно спектральное разложение в ряд Фурье  $f(t) = C_0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos(k\Omega t)$  подставить в формулу (4.16). В случае последовательности прямоугольных посылок при  $U_0 = 1$ :

$$f(t) = \frac{1}{\alpha} + \frac{2}{\alpha} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(\frac{\pi k}{\alpha})}{\frac{\pi k}{\alpha}} \cos(k\Omega t), \quad (4.17)$$

где  $\Omega = \frac{2\pi}{T}$  - круговая частота повторения посылок,  $T$  - период следования посылок. Подставляя (4.17) в (4.16), получим

$$U_{AM} = \frac{U_M}{\alpha} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{U_M}{\alpha} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(\frac{\pi k}{\alpha})}{\frac{\pi k}{\alpha}} \{ \sin[(\omega_0 + k\Omega)t + \varphi_0] + \sin[(\omega_0 - k\Omega)t + \varphi_0] \}. \quad (4.18)$$

Отсюда видно, что спектр амплитудно-манипулированного сигнала содержит несущую частоту и две боковые полосы - верхнюю и нижнюю. Форма боковых частот спектра манипулированного сигнала аналогична форме спектра модулирующих посылок, но спектр модулированного сигнала вдвое шире спектра модулирующих посылок.

В случае модулирующей функции  $f(t) = \sin(\Omega t)$  спектр амплитудно-модулированного сигнала также состоит из несущей частоты и двух боковых частот:

$$U_{AM} = U_M [1 + \sin(\Omega t)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = U_M \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{U_M}{2} \sin[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0] - \frac{U_M}{2} \sin[(\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0]. \quad (4.19)$$

Полученные выводы могут быть распространены на модулирующие сигналы произвольной формы.

При *фазовой модуляции*, при изменении модулирующего сигнала по закону  $f(t)$  и максимальном изменении начальной фазы на величину  $\Delta\varphi$  фаза сигнала изменяется по закону:

$$\theta = \omega_0 t + \varphi_0 + \Delta\varphi f(t). \quad (4.20)$$

Мгновенное значение фазомодулированного напряжения имеет следующий вид:

$$U_{\Phi M} = U_M \cos \theta = U_M \cos [\omega_0 t + \varphi_0 + \Delta \varphi f(t)], \quad (4.21)$$

где  $\Delta \varphi$  — девиация фазы или, как еще ее называют, *индекс фазовой модуляции*. Чем больше изменение модулируемого параметра, тем, очевидно, легче отличать друг от друга значения передаваемых сигналов на приеме. Поэтому значения девиации фазы следует выбирать возможно большим, т. е.  $\Delta \varphi = 90^\circ$ . При модуляции серией прямоугольных импульсных посылок (фазовая манипуляция), показанных на рис.4.13,а, фазоманипулированный сигнал при  $\Delta \varphi = 90^\circ$  имеет вид, показанный на рис.4.13,б.

Модулированный сигнал можно представить как сумму двух сигналов, имеющих одинаковую частоту  $\omega_0$ , но отличающихся значением начальной фазы. В частности, для случая  $\Delta \varphi = 90^\circ$ , изображенного на рис.4.13,б, эти сигналы показаны на рис.4.13,в и 4.13,г. Их несущие частоты отличаются по фазе на  $2\Delta \varphi = 180^\circ$ . Перепишем выражение (21) следующим образом:

$$U_{\Phi M} = U_M \left\{ \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \cos[\Delta \varphi f(t)] - \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \sin[\Delta \varphi f(t)] \right\}. \quad (4.22)$$

В случае фазовой манипуляции прямоугольными посылками

$$f(t) = \begin{cases} -1 & \text{при } n\tau_0 \leq t \leq (n+1)\tau_0 \\ +1 & \text{при } (n-1)\tau_0 \leq t \leq n\tau_0 \end{cases} \quad (4.23)$$

Получим:

$$U_{\Phi M} = U_M \left[ \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \cos \Delta \varphi - f(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \sin \Delta \varphi \right]. \quad (4.24)$$

В случае биполярного модулирующего сигнала, изображенного на рис.15.8,а

$$f(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{\pi k}{2}}{\frac{\pi k}{2}} \cos(k\Omega t). \quad (4.25)$$

Подставляя выражение (4.16) в (4.15), получим

$$U_{\Phi M} = U_M \left[ \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \cos \Delta \varphi - \sin \Delta \varphi \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{\pi k}{2}}{\frac{\pi k}{2}} \cos(k\Omega t) \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \right] =$$

$$\begin{aligned}
&= U_M \cos \Delta \varphi \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{U_M \sin \Delta \varphi \sin \frac{\pi k}{2}}{\frac{\pi k}{2}} \sin(\omega_0 t + k\Omega t + \varphi_0) + \\
&\quad + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{U_M \sin \Delta \varphi \sin \frac{\pi k}{2}}{\frac{\pi k}{2}} \sin(\omega_0 t - k\Omega t + \varphi_0). \quad (4.26)
\end{aligned}$$

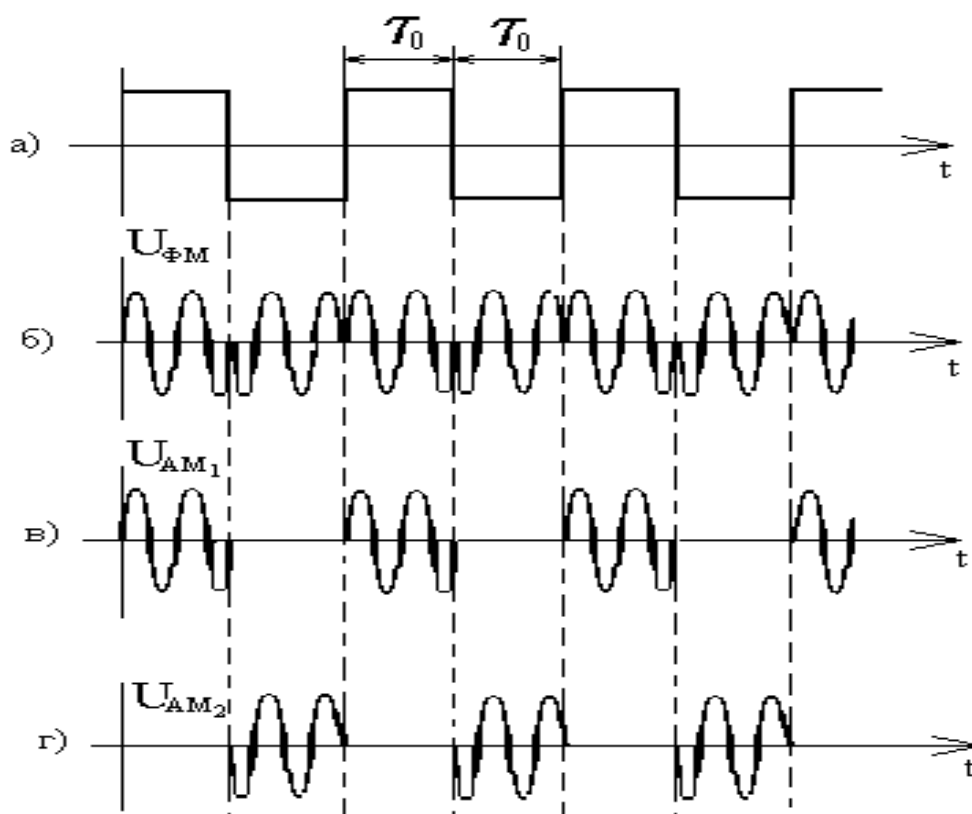


Рисунок 4.13 – Временные диаграммы сигналов при фазовой манипуляции:  
а — модулирующий сигнал; б — фазоманипулированный сигнал;  
в, г — составляющие фазоманипулированного сигнала.

Таким образом, в общем случае спектр ФМ колебания содержит несущую, симметрично от которой располагаются боковые составляющие, отстоящие на частотные интервалы, кратные частоте манипуляции. В рассматриваемом случае  $\Delta \varphi = 90^\circ$  спектр ФМ становится равным спектру АМ при подавлении несущего колебания.

На рисунках 4.14,б-д показаны спектры фазоманипулированных сигналов при различных индексах модуляции, а на рисунках 4.14,а для сравнения приведен спектр амплитудно-манипулированного сигнала.

На основании вышеизложенного можно сделать заключение о том, что при фазовой модуляции периодической последовательностью прямоугольных посылок:

- ширина спектра ФМ манипуляции равна ширине спектра АМ манипуляции и не зависит от индекса модуляции;
- амплитуды боковых частот ФМ сигнала отличаются от таковых при АМ на величину  $\sin \Delta \varphi$ .

В случае гармонической модулирующей функции  $f(t) = \sin(\Omega t)$  фаза модулированный сигнала имеет вид:

$$U_{\Phi M} = U_M \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \Delta \varphi \sin(\Omega t)), \quad (4.27)$$

или, разлагая косинус суммы, получаем:

$$U_{\Phi M} = U_M [\cos(\omega_0 t + \varphi_0) \cos(\Delta \varphi \sin(\Omega t)) - \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \sin(\Delta \varphi \sin(\Omega t))]. \quad (4.28)$$

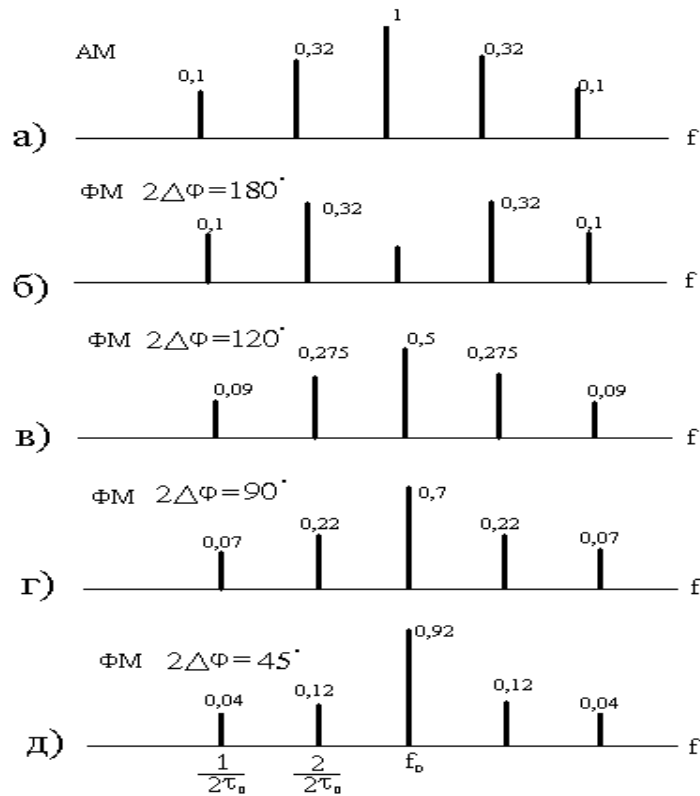


Рисунок 4.14 — Спектры манипулированных сигналов:

а) - спектр амплитудно-манипулированного сигнала; в) – д) - спектры фазоманипулированных сигналов

Из математики известно, что

$$\left. \begin{aligned} \sin(\Delta \varphi \sin(\Omega t)) &= 2J_1(\Delta \varphi) \sin(\Omega t) + 2J_3(\Delta \varphi) \sin(3\Omega t) + \dots \\ \cos(\Delta \varphi \sin(\Omega t)) &= J_0(\Delta \varphi) + 2J_2(\Delta \varphi) \cos(2\Omega t) + \dots \end{aligned} \right\} \quad (4.29)$$

где  $J_n(\Delta\varphi)$  — функция Бесселя первого рода,  $n$ -ого порядка от аргумента  $\Delta\varphi$ . Таким образом, при гармонической ФМ получается сигнал с бесконечным числом составляющих и отсутствует симметрия боковых составляющих относительно несущего колебания.

При *частотной модуляции*, изменение модулирующего сигнала по закону  $f(t)$  и максимальном изменении частоты на величину  $\Delta\omega$  частота сигнала изменяется по закону

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega f(t). \quad (4.30)$$

Изменение частоты сопровождается изменением фазы сигнала, причем мгновенная фаза сигнала связана с частотой очевидной зависимостью

$$\varphi(t) = \int_0^t \omega(t) dt + \varphi_0, \quad (4.31)$$

следовательно,

$$\varphi(t) = \omega_0 t + \Delta\omega \int_0^t f(t) dt + \varphi_0. \quad (4.32)$$

Таким образом, напряжение, модулированное по частоте, можно записать так:

$$U_{YM} = U_M \cos \left[ \omega_0 t + \Delta\omega \int_0^t f(t) dt + \varphi_0 \right]. \quad (4.33)$$

Обозначим в выражении (4.33) величину  $\Delta\omega \int_0^t f(t) dt = \theta(t)$ , тогда его можно записать в следующем виде:

$$U_{YM} = U_M \{ \cos[\omega_0 t + \varphi_0] \cos \theta(t) - \sin[\omega_0 t + \varphi_0] \sin \theta(t) \}. \quad (4.34)$$

При частотной манипуляции модулирующим сигналом является периодическая последовательность прямоугольных посылок (рис.4.15,а), т. е. передача осуществляется на двух сменяющих друг друга частотах: верхней частоте  $\omega_B$ , соответствующей положительному модулирующему сигналу, и нижней частоте  $\omega_H$ , соответствующей отрицательному сигналу. В этом случае в выражении (4.30)  $\omega_0$  соответствует средней частоте  $\omega_0 = (\omega_H + \omega_B)/2$ , а величина  $\Delta\omega = (\omega_B - \omega_H)/2$  называется девиацией частоты.

Переходная фаза сигнала при этом изменяется по следующему закону (рисунок 4.15,б):

$$\theta(t) = \begin{cases} -\Delta\omega(t + \frac{\tau_0}{2}) & \text{при } -\tau_0 < t < 0, \\ \Delta\omega(t - \frac{\tau_0}{2}) & \text{при } 0 < t < \tau_0. \end{cases}$$

Представим  $\cos\theta(t)$  и  $\sin\theta(t)$  в виде их разложений в ряды Фурье:



$$\left. \begin{aligned} \cos \theta(t) &= A_0 + \sum_{k=2,4,6,\dots}^{\infty} A_k \cos(k\Omega t) \\ \sin \theta(t) &= \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} B_k \sin(k\Omega t) \end{aligned} \right\}, \quad (4.35)$$

где  $\Omega$  — круговая частота повторения посылок;

$$\begin{aligned} A_0 &= \frac{1}{2\tau_0} \int_{-\tau_0}^{\tau_0} \cos \theta(t) dt = \frac{1}{2\tau_0} \left\{ \int_{-\tau_0}^0 \cos \left[ -\Delta\omega \left( t + \frac{\tau_0}{2} \right) \right] dt + \right. \\ &\quad \left. + \int_0^{\tau_0} \cos \left[ \Delta\omega \left( t - \frac{\tau_0}{2} \right) \right] dt \right\} = \frac{\sin \frac{\Delta\omega\pi}{\Omega 2}}{\frac{\Delta\omega\pi}{\Omega 2}}; \end{aligned}$$

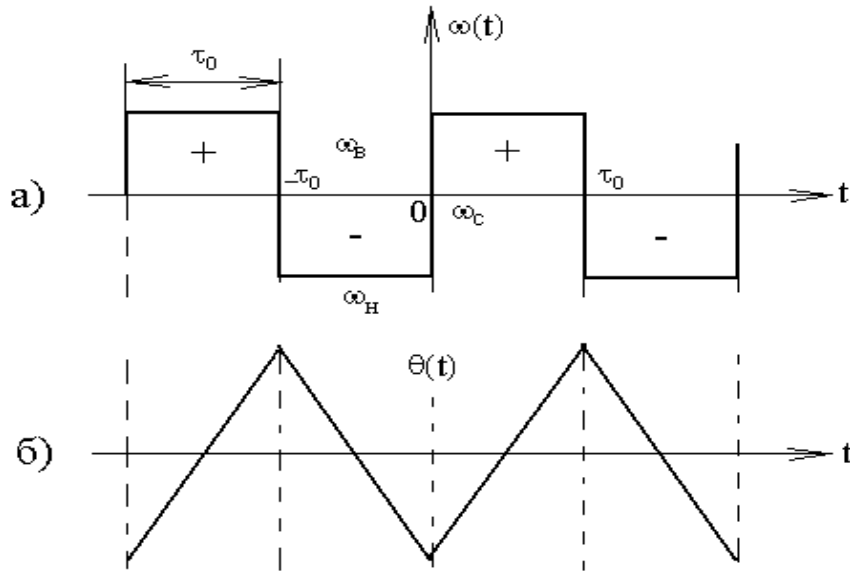


Рисунок 4.15 - Частотная манипуляция: а) - манипулирующий сигнал; б) - переходная фаза при частотной манипуляции

$$A_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} \cos \theta(t) \cos(k\Omega t) dt = \frac{4}{\pi} \frac{m \sin \frac{\pi m}{2}}{m^2 - k^2};$$

$$B_k = \frac{4}{\pi} \frac{m \cos \frac{\pi m}{2}}{m^2 - k^2};$$

где  $m = \frac{\Delta\omega}{\Omega}$  — индекс частотной модуляции. Подставляя выражение (4.35) в уравнение (4.34), получим

$$\begin{aligned}
U_{YM} = & U_M \frac{\sin \frac{\pi m}{2}}{\frac{\pi m}{2}} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + U_M \frac{2}{\pi} \sum_{k=2,4,6}^{\infty} \frac{m \sin \frac{\pi m}{2}}{m^2 - k^2} \times \\
& \times \left\{ \cos[(\omega_0 + k\Omega)t + \varphi_0] + \cos[(\omega_0 - k\Omega)t + \varphi_0] \right\} + \\
& + U_M \frac{2}{\pi} \sum_{k=1,3,5}^{\infty} \frac{m \cos \frac{\pi m}{2}}{m^2 - k^2} \left\{ \cos[(\omega_0 - k\Omega_1)t + \varphi_0] - \cos[(\omega_0 + k\Omega_1)t + \varphi_0] \right\}.
\end{aligned} \tag{4.36}$$

Отсюда следует, что спектр частотно-манипулированного колебания состоит из несущей частоты, верхней и нижней боковых частот; четные и нечетные боковые частоты подчиняются разным законам и отличаются по фазе на  $90^\circ$ ; спектры боковых частот отличаются от спектра модулирующего сигнала; форма спектра зависит от индекса модуляции.

#### 4.6 Связь между скоростью передачи и шириной канала

Знание спектров сигналов, используемых для передачи данных, динамики их изменения при различных видах сигналов, способов и параметров модуляции, а также переходных процессов в каналах при передаче этих сигналов, позволяет установить соотношения между скоростью передачи и требуемой шириной полосы пропускания используемого канала связи.

На практике нет необходимости (да и возможности) передавать весь спектр сигнала. Достаточно передать лишь те составляющие, в которых сосредоточена основная часть энергии ( $>50\%$ ). Так например, при передаче “точек” импульсами постоянного тока, основная часть энергии содержится в двух первых компонентах спектра: постоянной составляющей и первой гармонике с частотой  $f=1/2\tau_0$ , где  $\tau_0$  - длительность единичного элемента. Следовательно, минимально необходимая полоса частот канала связи в этом случае равна

$$\Delta F_{\min} = 1/(2\tau_0) = B/2, \tag{4.37}$$

где  $B$  — скорость модуляции, Бод. Анализируя спектры других видов сигналов, можно заметить, что через такую полосу также пройдет основная часть энергии этих сигналов.

Следовательно, предельная скорость модуляции при передаче импульсами постоянного тока будет равна:

$$B_{\max} = 2\Delta F_{\text{эф.}} \tag{4.38}$$

где  $\Delta F_{\text{эф}}$  — ширина полосы пропускания канала. Эта формула называется формулой Найквиста.

При передаче модулированных сигналов предельная скорость модуляции снижается вдвое за счет передачи двух боковых полос, т.е.:

$$\Delta F_{\min} = 1/\tau_0 = B, \quad \text{а} \quad B_{\max} = \Delta F_{\text{эф.}} \quad (4.39)$$

Эти же формулы справедливы для ЧМ и ФМ при малых индексах модуляции, т.е. при  $m_{\text{ЧМ,ФМ}} < 1$ .

При передаче модулируемых сигналов с одной боковой полосой требуемая ширина полосы канала связи уменьшится вдвое, т.е.:

$$B_{\max} \approx 2\Delta F_{\text{эф.}} \quad (4.40)$$

## 5. Помехи в линиях и каналах связи

### 5.1. Аддитивные и мультипликативные помехи

Помимо передаваемого сигнала в канале всегда присутствуют процессы различного происхождения, называемые *помехами* или *шумами*. По характеру воздействия на принимаемые сигналы различают помехи **аддитивные** и **мультипликативные**.

**Аддитивная** помеха представляет собой электрическое возмущение, складывающееся с сигналом. При этом напряжение на выходе приемного тракта можно представить как сумму переданного сигнала и аддитивной помехи

$$x(t) = s(t) + n(t). \quad (5.1)$$

**Мультипликативной** помехой называется случайное изменение коэффициента передачи канала связи  $\mu(j\omega t)$ . Принимаемые сигналы могут быть подвержены одновременному воздействию аддитивных и мультипликативных помех.

В общем случае передаваемый сигнал распространяется по нескольким путям (лучам). Тогда зависимость между принимаемым сигналом  $x(t)$  и передаваемым  $s(t)$  может быть представлена следующим образом:

$$x(t) = \sum \mu_k S(t - \tau_k) + n(t), \quad (5.2)$$

где  $\mu_k$  - коэффициент передачи  $k$ -го пути распространения сигнала;  $\tau_k$  - время запаздывания в  $k$ -м луче;  $n(t)$  - аддитивная помеха.

Во многих случаях имеет место только один путь распространения. Тогда выходной сигнал на выходе канала с помехой описывается выражением:

$$x(t) = \mu S(t - \tau) + n(t). \quad (5.3)$$

Параметры канала  $\mu$  и  $\tau$  в общем случае являются функциями времени.

Большое число аддитивных помех имеет флуктуационный характер с нормальным законом распределения. **Флуктуационные помехи** представляют собой реализацию стационарного случайного процесса с *нормальным* распределением вероятностей (гауссовский процесс). Помехи этого вида имеют место во всех типах каналов связи, используемых в компьютерных сетях и заметно влияют на достоверность передачи данных.

Практическое значение нормальной флуктуационной помехи связано с тем, что, во-первых, она неизбежно присутствует во всех реальных КС в виде тепловых шумов, возникающих в каналобразующей аппаратуре, во-вторых, она достаточно хорошо аппроксимирует сумму любых помех, происходящих от различных источников.

Для характеристики распределения энергии составляющих помехи по частоте используется понятие энергетического спектра  $G(\omega)$ , который характеризует поведение реализаций случайной помехи в среднем. На практике функция  $G(\omega)$  обычно задается графически либо аналитически. Для реальных случайных процессов  $G(\omega)$  спадает с ростом частоты. Случайный процесс, у которого  $G(\omega) = N_0$  - постоянная величина, называется **белым шумом**. Здесь  $N_0$  - спектральная плотность, под которой понимается мощность шума  $P_n$ , приходящаяся на 1 Гц полосы частот.

$$N_0 = P_n / \Delta F. \quad (5.4)$$

В большинстве случаев нормальная флуктуационная помеха имеет равномерный спектр в столь широкой полосе частот, что ее можно считать практически бесконечной. Такая помеха носит название **“нормальный аддитивный белый шум”**, которая полностью характеризуется спектральной плотностью.

## 5.2. Статистические характеристики флуктуационной помехи

Плотность вероятности гауссовой помехи распределена по нормальному закону

$$P(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(U_n - \overline{U_n})^2}{2\sigma_n^2}}, \quad (5.5)$$

где  $U_n$  - мгновенное значение помехи;  $\overline{U_n}$  - среднее значение помехи, которое обычно равно нулю;  $\sigma_n^2$  - дисперсия помехи, равная средней мощности помехи на единичном сопротивлении;  $\sigma_n = U_{n\text{эф}}$  - эффективное напряжение помехи.

Интегральная функция распределения  $F(U_0)$  представляет собой вероятность того, что мгновенное напряжение помехи не превысит некоторое пороговое значение  $U_0$ .

$$F(U_0) = P\{U_n < U_0\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-U^2/2} dU = 0,5[1 + \Phi(U_0)], \quad (5.6)$$

где  $U_0 = U_n / \sigma_n$  - относительное значение помехи;

$$\Phi(U) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^U e^{-t^2/2} dt$$

-табулированный интеграл вероятности или *функция Крампа*.

Следует заметить, что функция Крампа является нечетной, т.е.  $\Phi(-U) = -\Phi(U)$ , кроме этого  $\Phi(\infty) = 1$  и  $\Phi(0) = 0$ . Графические зависимости функции распределения плотности вероятности нормального флуктуационного процесса и интегральной функции распределения показаны на рисунке 5.1.

Вероятность того, что уровень помехи примет значение, лежащее в заданных пределах, определяется по формуле:

$$P\{U_1 < U < U_2\} = \frac{1}{2} [\Phi(U_2) - \Phi(U_1)]. \quad (5.7)$$

Вероятность того, что помеха превысит некоторый пороговый уровень

$$P(U > U_0) = \frac{1}{2} [\Phi(\infty) - \Phi(U_0)] = \frac{1}{2} [1 - \Phi(U_0)]. \quad (5.8)$$

Вероятность превышения помехой порогового уровня  $U_0$  быстро падает с увеличением  $U_0$ . Так вероятность превышения  $U_0 = 1$  равна 0,16; при  $U_0 = 3$   $P = 0,0013$  и при  $U_0 = 4$  вероятность становится равной  $P = 3,5 \cdot 10^{-5}$  и т.д.

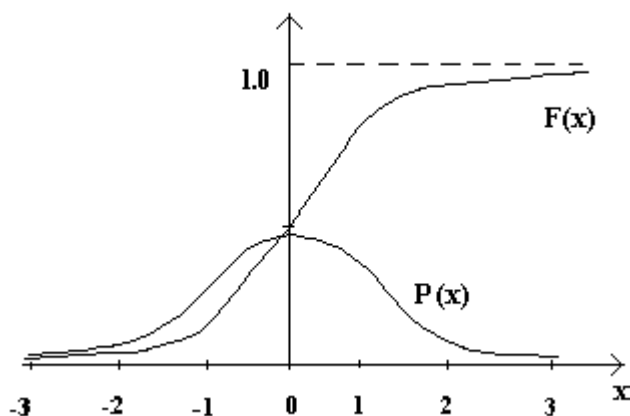


Рисунок 5.1 - Зависимости функции распределения плотности вероятности нормального флуктуационного процесса  $P(x)$  и интегральной функции распределения  $F(x)$

Отсюда следует, что *колебания флуктуационной помехи не превышают трехкратного эффективного значения помехи*, т.е.  $U_p \leq 3\sigma_n$ . Отношение максимального выброса напряжения помехи к эффективному значению получил название **пикфактор помехи**. Для нормальной флуктуационной помехи  $U_{\text{макс}}/U_{\text{эфф}} = 3,5 \div 4,6$ . Поэтому флуктуационную помеху называют гладкой.

### 5.3. Импульсные помехи, занижения уровня и кратковременные перерывы

Импульсная помеха (ИП) представляет собой последовательность не перекрывающихся по времени в общем случае нерегулярных импульсов. При её воздействии на вход

узкополосной системы напряжение помех на выходе этой системы сохраняет импульсный характер, при условии, что средние интервалы между импульсами превышают длительность вызванных импульсами помех переходных процессов. Если же полоса приёмного тракта столь узка, что это условие не соблюдается, то возбуждённые отдельными импульсами колебания будут перекрываться и помеха на выходе может по структуре оказаться ближе к флуктуационной, чем импульсной. Импульсную помеху называют также помехой, сосредоточенной по времени. Осциллограмма импульсной помехи показана на рисунке 5.2.

Основные причины появления в каналах связи импульсных помех:

- 1) кратковременные перерывы в линейном тракте;
- 2) перерывы в цепях питания;
- 3) грозовые разряды;
- 4) эксплуатационные переключения на каналах и измерения;
- 5) перегрузки ВЧ систем передачи.

Одним из основных параметров импульсной помехи является её амплитуда – величина максимального выброса напряжения. Амплитуда импульсной помехи – величина случайная и зависит от ряда факторов: мощности и типа источника импульсных помех, точки проникновения в КС, частотных характеристик КС и т. д.

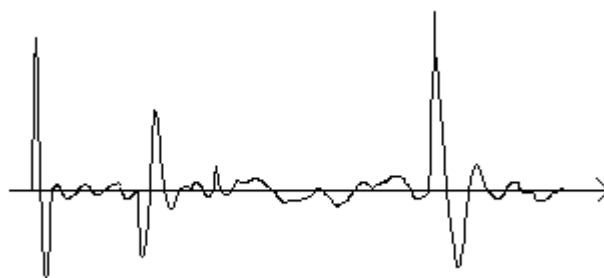


Рисунок 5.2 – Пример реализации импульсной помехи

В настоящее время используют две формы представления амплитудного распределения ИП: суммарного времени превышения помехой определённых значений напряжения за сеанс измерения и вероятность превышения амплитуды помехи определённых значений напряжения. Кроме распределения амплитуды импульсной помехи рассматривают временные характеристики ИП. Эти характеристики являются наиболее важными. К ним относится интенсивность потока импульсных помех (количество помех в единицу времени).

Импульсные помехи в каналах связи часто появляются группами, так называемыми «пачками». «Пачка» ИП – группа помех, временные интервалы между рядом стоящими импульсами в которой не превышают определённой длительности  $t_{ип}$ . На практике  $t_{ип}$  принимают равным 0,5 и 20 с. Важнейшей характеристикой «пачки помех» является вероятность распределения длительности пачки и распределение числа импульсных помех в пачке.

В процессе передачи информации уровень сигнала в канале связи не остаётся постоянным. Он изменяется как в сторону занижения, так и сторону увеличения. Занижение

уровня различают по глубине (значению изменения уровня сигнала в сторону уменьшения относительно номинального уровня) и продолжительности занижения уровня.

Занижение уровня глубиной более **17,5 дБ** определяется как **перерыв**. По длительности перерывы делятся на короткие и продолжительные. Границей этого деления является интервал времени **300 мс**, так как это объясняется особенностью коммутируемых каналов нарушать установленное соединение при наличии перерывов длительностью более 300 мс. Т. о. коротким называется перерыв длительностью менее 300 мс, а продолжительным – более 300 мс.

Если занижения уровня, как правило, не приводят к появлению ошибок при передаче дискретной информации, то перерывы являются одной из основных причин, снижающих достоверность, пропускную способность и надёжность СПД. 80% ошибок при передаче цифровой информации в компьютерных сетях появляется за счёт кратковременных перерывов.

Статистически, перерывы, как и импульсные помехи, характеризуются распределением во времени, распределением интервалов между перерывами, распределением пачек перерывов, распределением числа перерывов в пачке.

Для уменьшения количества ошибочно принятых символов при передаче двоичной информации МККТТ нормируются импульсные помехи и перерывы, возникающие в каналах связи.

Основными мешающими воздействиями в оптических каналах, кроме дисперсии сигналов, являются тепловые шумы, уровень которых весьма мал. Поэтому в оптические каналы передачи данных вероятность ошибки находится на уровне  $10^{-9}$ – $10^{-10}$ .

Затухание оптических линий связи варьируется от 300 дБ/км для пластиковых волокон до 0,21 дБ/км – для одномодовых волокон.

## 6. Обработка сигналов в приемниках СПД

### 6.1. Искажение посылок при передаче дискретной информации

Различного рода помехи (шумы), амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики КС, скачки уровня и др. называют **первичными** характеристиками каналов. Они позволяют выявить характер физических явлений, влияющих на достоверность приёма информации. Под **вторичными** характеристиками КС понимают искажения краев посылок (единичных элементов) и дробления сигналов. Эти характеристики позволяют по результатам приёма прямоугольных посылок непосредственно судить о достоверности принимаемой информации.

Причинами искажений единичных элементов являются первичные характеристики КС (например, воздействие флуктуационных и импульсных помех). Но зависимость между этими характеристиками и верностью приёма информации к настоящему времени в полном объёме ещё не установлены. Искажение формы единичного элемента можно устранить, (например, подать на триггер) однако устранить искажения в длительности и знаке единичного элемента остаются.

Рассмотрим последовательность единичных элементов данных (рис. 6.1). Моменты времени, в которые знак импульса на передающем конце может измениться на противоположный (точки а, б, в, г, д, е, ж...) называются характеристическими моментами модуляции (**ХММ**). Моменты времени, в которые знак посылки действительно изменился (точки а, б, г, е), называются значащими или действительными характеристическими моментами модуляции (**ЗХММ**). При приёме различают соответственно характеристические моменты восстановления (**ХМВ**) и значащие характеристическими моменты восстановления (**ЗХМВ**).

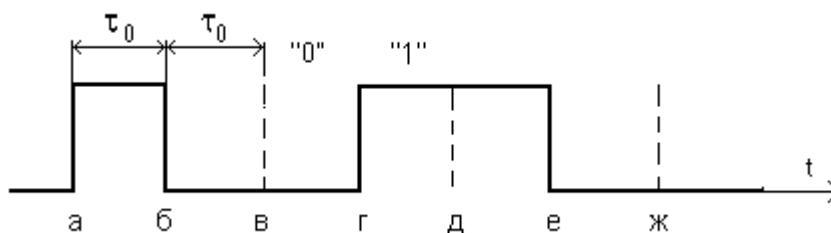


Рисунок 6.1 – Пример последовательности единичных элементов данных

В общем случае ДХММ и ДХМВ смещены относительно друг друга. При наличии в КС мешающих факторов, ЗХМВ смещены относительно ЗХММ на время, отличающееся от времени распространения  $t_p$  (рисунок 6.2).



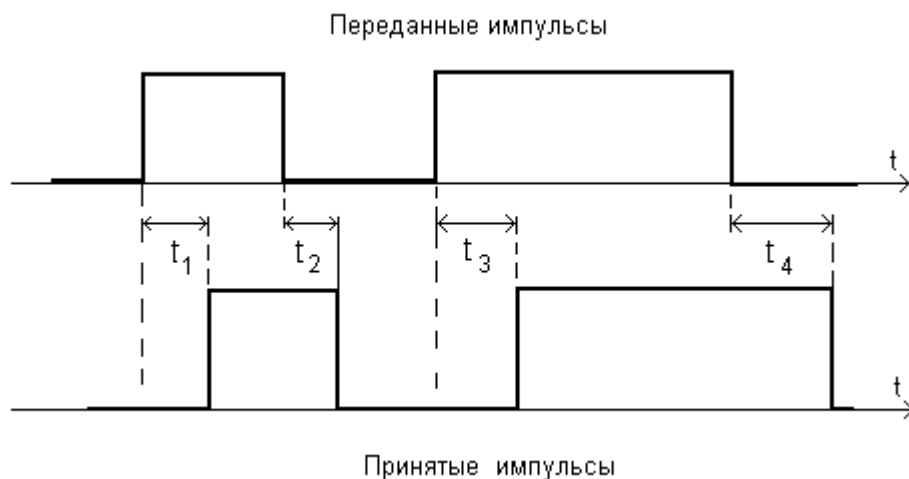


Рисунок 6.2 – Смещение характеристических моментов восстановления

Первый импульс удлинен на время  $\theta_1 = t_2 - t_1$ , а третий укорочен на  $\theta_3 = t_3 - t_4$ . При бесконечной последовательности импульсов можно считать, что полная зона ДХМВ составляет

$$\theta = t_{\max} - t_{\min},$$

где  $t_{\max}$  и  $t_{\min}$  соответственно максимальное и минимальное значения смещения ДХМВ относительно ДХММ.  $\theta$  - **абсолютная величина краевых искажений**. Краевые искажения – это изменение длительности принятых единичных элементов. Удобнее пользоваться **относительной** величиной краевых искажений

$$\delta = \theta / \tau_0 * 100\% = (t_{\max} - t_{\min}) / \tau_0 * 100\% = B (t_{\max} - t_{\min}) * 100\%.$$

Здесь  $B$  – скорость передачи, Бод.

Краевые искажения в свою очередь подразделяются на: преобладания  $\delta_{\text{пр}}$ , характеристические  $\delta_{\text{хар}}$  и случайные  $\delta_{\text{сл}}$ . Если искажения отдельных посылок  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i$  остаются постоянными во времени (по величине и знаку), то их относят к искажениям, называемым **преобладаниями**.

Особенностью **характеристических** искажений является зависимость их величины от характера передаваемой последовательности. Длительность посылок на выходе при этом меняется в зависимости от вида предыдущих посылок.

**Случайные искажения** вызываются обычно помехами и являются случайной величиной, меняющейся во времени. В общем случае принимаемые посылки подвержены действию искажений указанных типов одновременно:

$$\delta_{\text{общ}} = \delta_{\text{пр}} + \delta_{\text{хар}} + \delta_{\text{сл}}.$$

**Дроблением** посылок называется искажение, состоящее в смене полярности сигнала во время передачи посылки. Действие дроблений сопровождается изменением числа ЗХМВ по сравнению с ЗХММ. Момент начала дробления и его продолжительность носит случайный характер (рис.6.2).

Многочисленными исследованиями на проводных КС при передаче двоичной информации установлено, что в большинстве случаев распределение смещений ЗХМВ под-

чинено нормальному закону распределения. Однако это не исключает возможности иных распределений в других условиях. Кривая плотности распределения краевых искажений:

$$\varphi(\delta) = \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{(\delta - \bar{\delta})^2}{2\sigma^2}\right),$$

где  $\bar{\delta}$  - среднее значение краевых искажений  $\approx 0$ ;  $\sigma$  - среднеквадратичное отклонение.

Распределение длительности дроблений для большинства проводных каналов подчиняется логарифмически-нормальному закону, т. е. по нормальному закону распределена не длительность дроблений, а её логарифм.

$$\varphi(t_{dp}) = \frac{1}{t_{dp} \tilde{\sigma} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\lg t_{dp} - \tilde{m})^2}{2\tilde{\sigma}^2}\right), \quad 0 < t_{dp} < \infty.$$

Здесь  $\tilde{m}$  – математическое ожидание  $\lg t_{dp}$ ,  $\tilde{\sigma}$  - среднеквадратичное отклонение  $\lg t_{dp}$ .

## 6.2. Способы регистрации единичных элементов

### 6.2.1. Стробирование

В аппаратуре передачи данных устройства регистрации включаются, как правило, после демодулятора и служат для правильной фиксации единичных элементов при наличии краевых искажений или дроблений. В зависимости от вида искажений применяют стробирование, интегрирование или комбинированный метод регистрации.

Метод стробирования заключается в том, что значение единичного элемента проверяется в момент времени, наименее подверженный искажениям, т.е. в середине посылки, путем подачи на ключевые элементы стробирующего импульса (*строба*). В качестве стробов используются последовательность коротких импульсов с периодом следования  $\tau_0$ , вырабатываемое специальной схемой синхронизации. В зависимости от вида информации, поступающей со схемы сравнения демодулятора (однофазной или парафазной), применяют устройства, представленные на рисунках 6.3,а и 6.3,б соответственно.

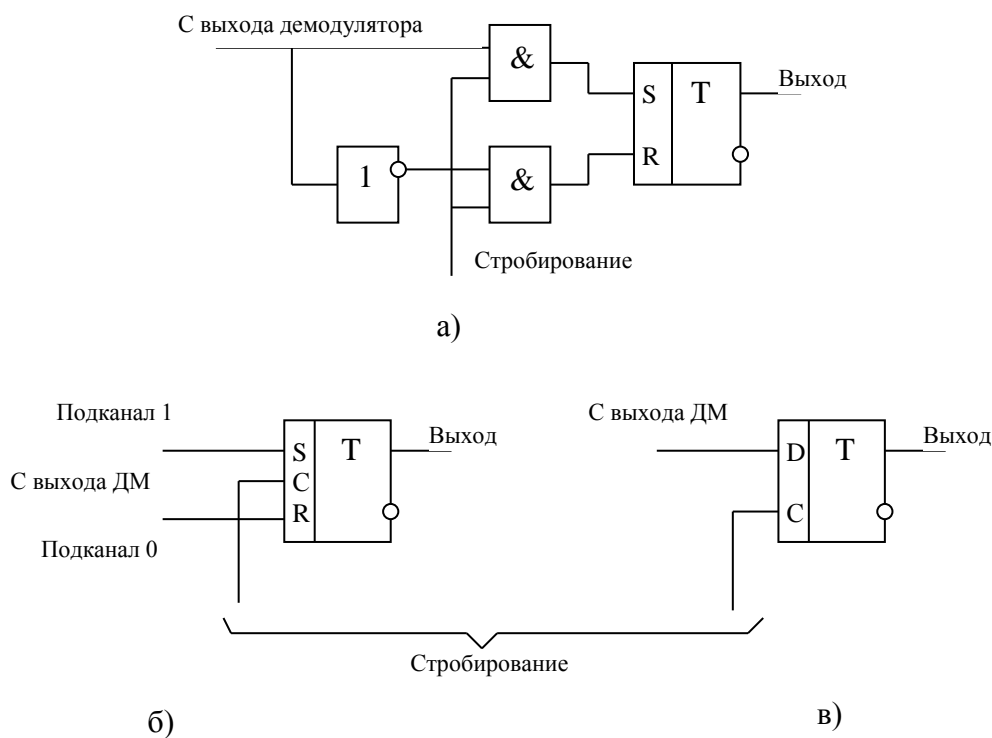


Рисунок 6.3 – Схемы регистрации единичных элементов стробированием

В случае использования в качестве регистрирующего элемента асинхронного RS-триггера функцию стробирования выполняет логические элементы И (рисунок 6.3,а). Применение синхронного RS-триггера позволяет исключить схемы совпадения И (рисунок 6.3,б). Следует заметить, что использование в качестве регистра синхронного D-триггера (рисунок 6.3,в) позволяет еще более упростить схему (рисунок 6.11,а) путем исключения инвертора. Временная диаграмма функционирования устройства регистрации единичных элементов со стробированием показана на рисунке 6.4.

Важнейшим параметром, определяющим вероятность ошибочной регистрации единичных элементов при наличии искажений, является исправляющая способность устройства  $\mu_{эф}$ , численно равная максимальной величине искажений, при которой еще осуществляется правильный прием.

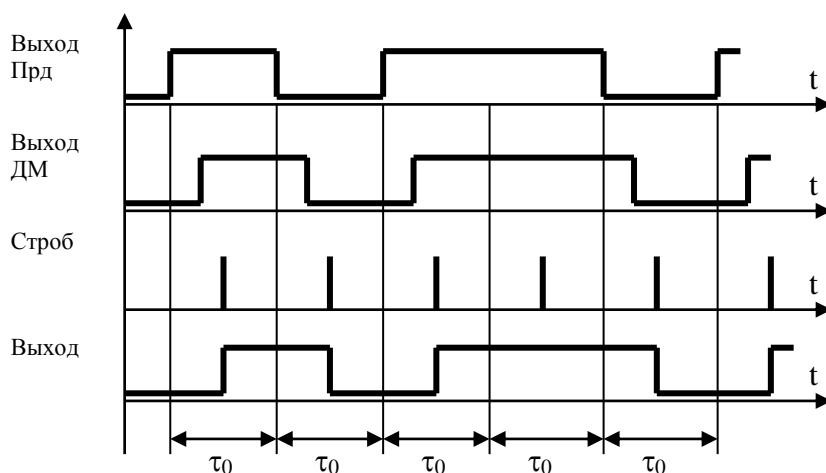


Рисунок 6.4 - Временные диаграммы регистрации единичных элементов стробированием

### 6.2.2. Интегральный способ регистрации

Интегральный способ регистрации осуществляется не на основании одного отсчета, взятого в середине посылки, а путем анализа процесса интегрирования в течение длительности единичного интервала  $\tau_0$  раздробленных частей сигнала, подвергнувшегося искажению. Интегральный метод может быть реализован путем непрерывного интегрирования или дискретного суммирования отсчетов.

На рисунке 6.5 приведены функциональная схема, реализующая непрерывный интегральный метод регистрации.

Особенностью схемы является то, что импульс отсчета (строб) должен подаваться до завершения единичного интервала, т.е. в момент времени равный примерно  $0,98 \tau_0$ , а в следующий момент от  $0,98 \tau_0$  до  $\tau_0$  необходимо обеспечить сброс (гашение) интеграторов. Для этого на специальные выходы интеграторов подают гасящий импульс, который приводит их в исходное состояние. Импульс сброса сформируется элементом задержки DD2 путем задержки строба на время регистрации. Следует заметить, что в схеме должны использоваться аналоговые ключи SW и аналоговые схемы сравнения.

Временные диаграммы интегрального способа регистрации единичных элементов показаны на рисунке 6.6.

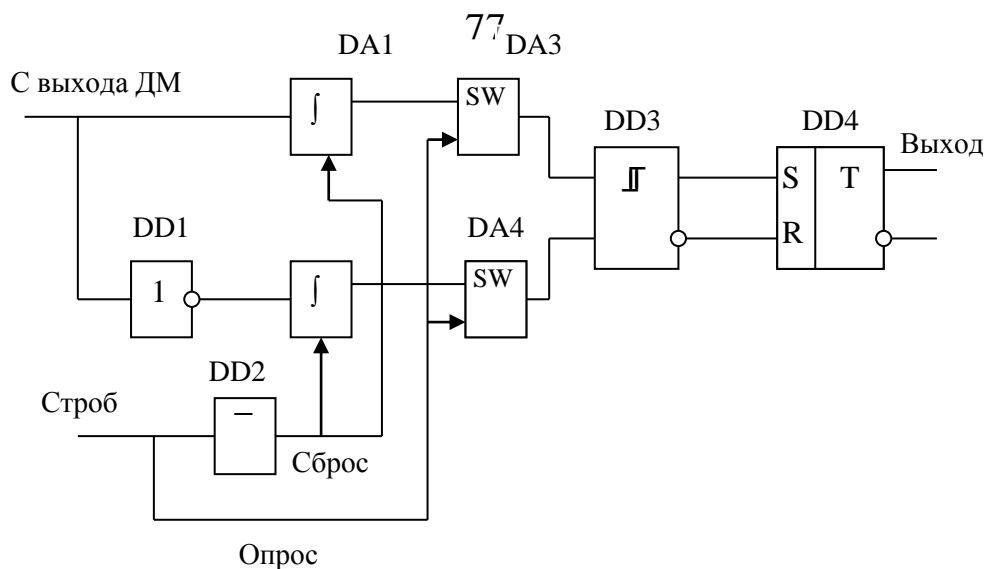


Рисунок 6.5 - Схема регистрации единичных элементов интегрированием

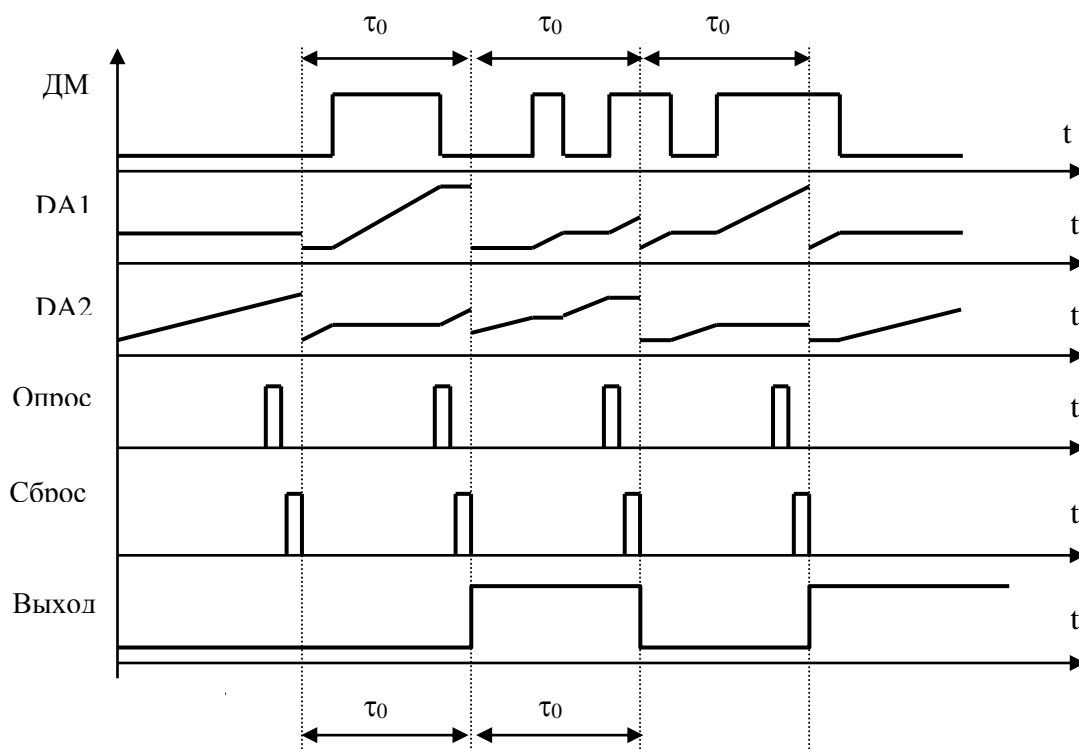


Рисунок 6.6 – Временные диаграммы интегрального способа регистрации

### 6.2.3. Комбинированный способ регистрации единичных элементов

При дискретном суммировании отсчетов, поступивший единичный элемент стробируется нечетное число раз (обычно 3-5), а результаты отсчетов накапливаются в счетчиках импульсов. Решение принимается по правилу большинства. Если в процессе суммирования получено большее количество единичных отсчетов в подканале "1", чем в подканале "0", то принимается решение, что был передан единичный элемент, соответству-

ющий символу логической "1" и наоборот. Дискретное суммирование отсчетов называется еще *комбинированным* методом регистрации.

Функциональная схема, реализующая этот метод, представлена на рис.6.7. Дискретные отсчеты в подканалах "1" и "0" осуществляется за счет подачи стробирующих импульсов на синхронизирующие входы двоичных счетчиков. Длительность сигнала опроса, а также время задержки элемента "1" должно быть больше суммарного времени задержки схемы И и времени переключения выходного триггера. В приведенной схеме используется парафазный вход, которой применяется, если имеются отдельные выходы детекторов подканалов "1" и "0". Если же в приемном устройстве есть только однофазный выход (например, в схеме частотного дискриминатора), то счетный вход 2 в этом случае соединяется со входом 3 через инвертор, как это сделано, например, в схеме с аналоговым интегрированием.

Выигрыш в отношении сигнал/помеха при комбинированном методе пропорционален числу отсчетов на интервале анализа. Для повышения точности при дискретном суммировании отдельным отсчетам можно придать различный вес. Так, например, при наличии краевых искажений целесообразно отсчетам, находящимся ближе к середине единичного элемента, придавать больший вес, а расположенных на краях - меньший. Однако заметного выигрыша помехоустойчивости такой метод не дает.

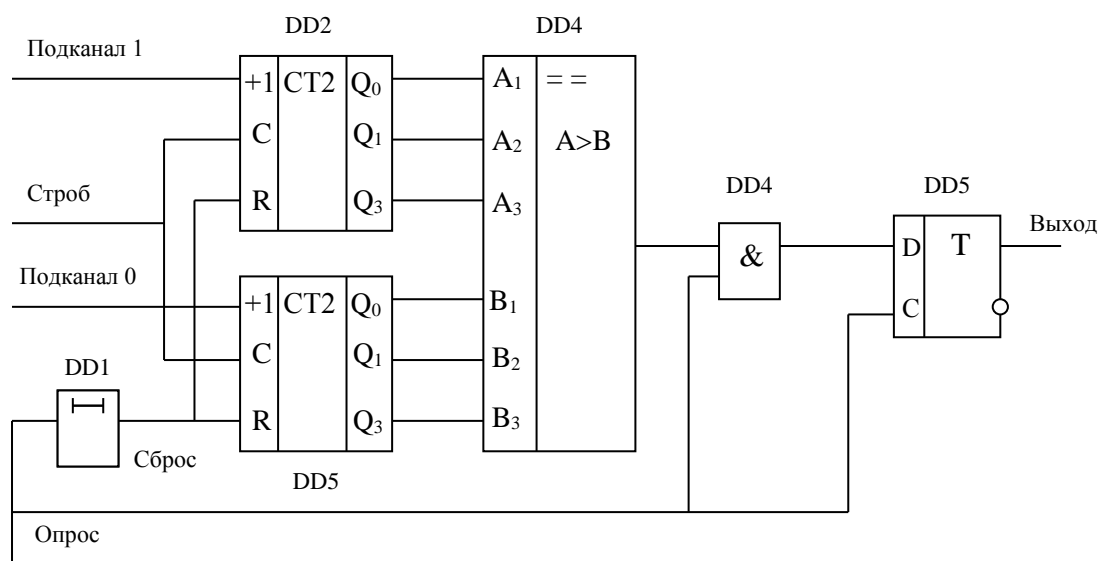


Рисунок 6.7 – Схема регистрации единичных элементов комбинированным способом

#### 6.4. Исправляющая способность приемников

Под исправляющей способностью приемника понимают способность приемного устройства правильно регистрировать единичные элементы сигналов при наличии в них искажений. В зависимости от вида искажений различают исправляющую способность по краевым искажениям и по дроблениям. Количественно исправляющая способность определяется максимальной величиной искажений, при которых еще возможен правильный

прием сигналов. Исправляющая способность, в зависимости от условий ее определения, подразделяется на теоретическую, эффективную и номинальную.

*Теоретическая* исправляющая способность рассчитывается при идеальных условиях работы приемного устройства. При вычислении *эффективной* исправляющей способности учитываются реальные параметры конкретного приемника (конечная длительность стробирующих импульсов, погрешность синхронизации и др.). *Номинальная* исправляющая способность представляет собой минимальную величину эффективной исправляющей способности, измеренную для группы однотипных приемников.

Теоретическая исправляющая способность при наличии краевых искажений  $\mu_T$  определяется максимальной величиной искажения, при котором еще возможен правильный прием, т.е.  $\mu_T$  равна 50%. Эффективная исправляющая способность  $\mu_{эфф}$  рассчитывается с учетом длительности строба  $a$  и погрешности установки его по отношению к середине единичного элемента  $\varepsilon_c$  (погрешности синхронизации). Для расчета воспользуемся рисунком 6.8.

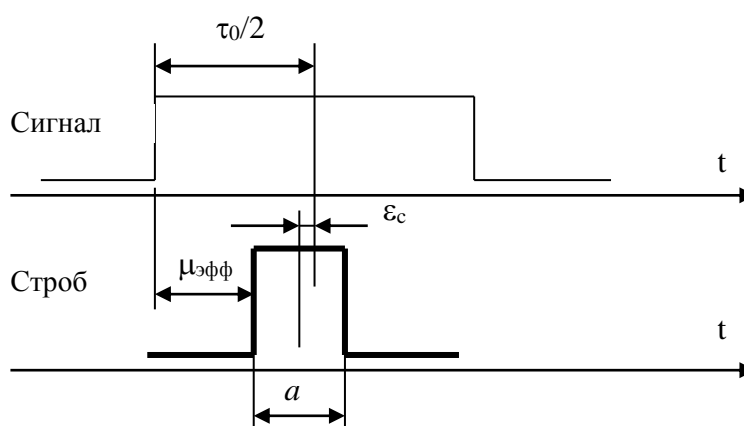


Рисунок 6.8 – Стробирование единичного элемента сигнала в реальных условиях

Из рисунка видно, что

$$\mu_{эфф} = [(\tau_0 - a) / 2 - \varepsilon_c] / \tau_0 .$$

Для расчета исправляющей способности при наличии дроблений воспользуемся временными диаграммами (рисунок 6.6). Отсюда теоретическая исправляющая способность по дроблениям  $v_T$  равна  $0,98(\tau_0/2) = 49\%$ .

При расчете эффективной исправляющей способности по дроблениям  $v_{эфф}$  предположим, что сравнение результата интегрирования осуществляется по переднему фронту импульса строба, длительность которого равна  $a$ , а сброс интеграторов происходит по заднему фронту строба. В этом случае

$$v_{эфф} = [(\tau_0/2 - a) - \varepsilon_c] / \tau_0 .$$

## 7. Методы повышения верности передачи данных

### 7.1. Общая характеристика

Незащищенные каналы (НК) передачи данных обеспечивают передачу дискретных сигналов с коэффициентом ошибки по единичным элементам в пределах  $10^{-3} - 10^{-5}$ . Нижняя граница этого диапазона соответствует дискретным каналам, образованным по коммутируемым линиям городских телефонных сетей, и коротковолновым каналам связи. Верхняя граница относится к каналам, организованным на выделенных (некоммутируемых) линиях и каналах, получаемым за счет уплотнения линий системы с ИКМ. Вероятность ошибки в компьютерных сетях должна быть не хуже  $10^{-6}$ , а в ряде систем может снижаться до  $10^{-7}$ , из чего следует, что перед обработкой информации в ЭВМ верность передачи ее в звене телеобработки должна быть повышена на 2-4 порядка (от  $10^{-3}$  по элементам до  $10^{-7}$  по знакам). Снижение количества ошибок может быть обеспечено за счет улучшения качественных характеристик каналов связи, аппаратуры уплотнения, применения помехоустойчивых методов модуляции. Однако, возможности данного направления довольно ограничены. Значительного повышения качества связи можно достичь только с помощью дополнительных методов защиты от ошибок, реализуемых специальными устройствами защиты от ошибок (УЗО), либо программным способом при обработке данных. Применение УЗО в виде отдельных аппаратных средств более характерно для незащищенных каналов низкого качества, где защита от ошибок программным способом требует значительных затрат машинного времени.

Методы защиты от ошибок зависят от типа каналов, применяемых в звене передачи данных (ПД) и регламентируются соответствующими протоколами канального уровня (BSC, DDCMP, HDLC и др.). При симплексных каналах для защиты информации используется многократное повторение одного и того же блока данных (кадра) или корректирующие коды, исправляющие ошибки. В случае дуплексных и полудуплексных каналов защита информации осуществляется с помощью кодов, обнаруживающих ошибки. Блок, в котором обнаружены искаженные символы, повторяется по запросу, посылаемому по постоянно действующему каналу обратной связи (ОС) на передающую сторону.

При многократной передаче каждая кодовая комбинация (блок) передается нечетное количество раз, а на приеме производится сравнение принятых знаков, и решение принимается голосованием по большинству (мажоритарный метод). Выбирая нужное количество повторений  $b$ , можно обеспечить сколь угодно малую вероятность ошибок, но и эффективная скорость передачи при этом снижается в  $b$  раз.

Поток ошибок в канале отличается большой неравномерностью; ошибки часто группируются в пакеты, разделенные интервалами, в течение которых ошибки появляются редко. Кодовые методы исправления ошибок требуют больших аппаратных затрат и поэтому в системах телеобработки находят относительно редкое применение (в ряде случаев используются коды Хемминга).

Большое распространение для исправления ошибок получили системы с обратной связью. Системы с ОС, в зависимости от назначения канала обратной связи, делятся на системы с *решающей обратной связью* (РОС) и системы с *информационной ОС* (ИОС). В таких системах ОС используется для информирования передатчика о текущем состоянии



канала ПД и изменения избыточности передачи в зависимости от количества и характера ошибок.

В системах с РОС решение о необходимости повторения информационного блока вырабатывается на приемной стороне на основе анализа его на отсутствие ошибок. Если ошибки не обнаружены и имеется свободный буфер для записи блока, то в канал ОС посылается подтверждение (квитанция) правильности приема, а в противном случае – запрос повторной передачи поступившего принятого блока. Поэтому системы с РОС часто называют системами с автоматическим запросом при ошибках (АЗО) или системами ARQ – от английского выражения «*Automatic Request*».

В системах с ИОС по каналу осуществляется передача всего принятого информационного блока, который на передающей стороне сравнивается с переданным. При их совпадении в канал связи поступает следующий блок, а при обнаружении ошибок в прямой канал посылается команда «Стирание», и искаженный при передаче блок передается повторно. В более сложных системах с ИОС по обратному каналу передается не весь блок, а некоторая комбинация, отражающая характерные признаки принятого сообщения.

В системах телеобработки количество повторений одного и того же блока ограничивается, и при превышении заданного числа повторений сигнализируется аварийное состояние канала ПД.

## 7.2. Системы с решающей обратной связью

В настоящее время наибольшее распространение получили системы с РОС, простейшей разновидностью которых являются системы с ожиданием подтверждения (РОС-ОЖ). Структурная схема системы РОС-ОЖ представлена на рисунке 8.1.

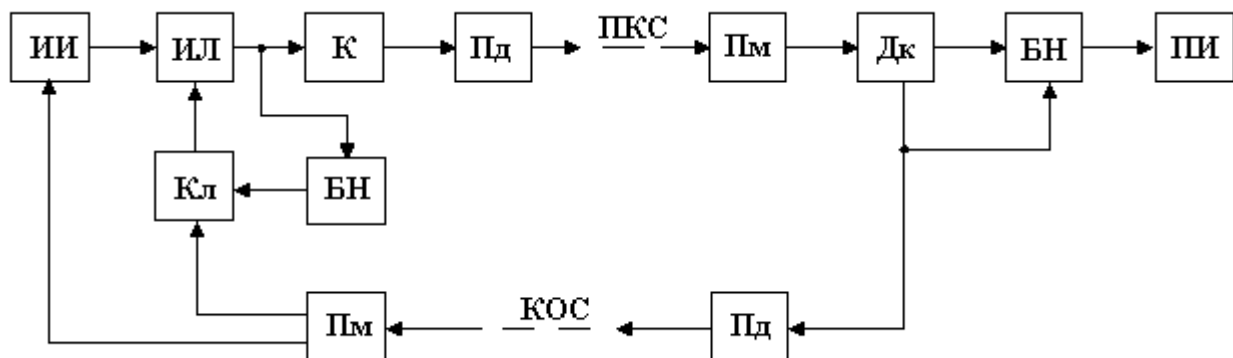


Рисунок 8.1 – Система передачи данных с РОС-ОЖ

Кодовая  $n$ -разрядная комбинация, поступавшая от источника информации (ИИ), через логическую схему ИЛИ, формируется в блок, кодируется помехоустойчивым кодом в кодере (К) и с помощью передатчика (ПД) выдается в прямой канал связи (ПКС). Одновременно информационный блок заносится в буферный накопитель (БН), после чего ИИ останавливается, и передача прекращается до приема сигнала ОС. На удаленной станции

поступающее сообщение регистрируется приемным устройством (ПМ), затем декодируется в блоке ДК, заносится в БН и при отсутствии в нем ошибок выдается потребителю информации (ПИ). При обнаружении ошибки ДК посылает через передатчика канала ОС сигнал повторного запроса искаженного блока, а принятая комбинация, находящаяся в БН, стирается.

На передающей стороне приемник сигналов ОС, приняв запрос, формирует управляющий сигнал, который открывает ключ (КЛ), и блок, находящийся в БН передатчика, повторно поступает ПКС. Одновременно передаваемая комбинация вновь запоминается в накопителе БН. В случае приема сигнала подтверждения КЛ остается закрытым, и от ИИ запрашивается новый блок данных, который после кодирования в ПКС и заносится в БН на место предыдущего.

При трансформации сигналов «Запрос» в «Подтверждение» под действием помех в канале ОС, возможно пропадание блока, а при обратном преобразовании подтверждения в запрос один и тот же блок передается дважды, то есть имеет место так называемая «вставка» блока (кадр-дубликат). Для уменьшения вероятности выпадения или вставки используют циклическую нумерацию блоков, а на приемной стороне контролируют очередность их поступления. При нарушении очередности предыдущий блок запрашивается вновь.

Достоинством систем с РОС является их простота, а недостатком – потери времени на ожидание сигнала подтверждения или запроса. Такие системы целесообразно применять в полудуплексных каналах ПД, когда после завершения передачи блока устройство переключается в режим приема сигнала по каналу ОС, и время ожидания частично совпадает с временем переключения направления передачи.

Более высокую эффективную скорость передачи информации по каналам связи обеспечивают системы РОС с непрерывной передачей (РОС-НП). В таких системах закодированные помехоустойчивым кодом блоки данных поступают непрерывно в ПКС без ожидания сигнала подтверждения. Максимальное количество блоков  $W$ , которое можно передать без подтверждения их приема, называют *шириной окна*. Одновременно идет запись информации буферный накопитель. При обнаружении ошибки в информационном блоке приемник передает по каналу ОС сигнал запроса и блокирует запись в приемный накопитель последующих  $W - 1$  блоков, что предотвращает возможность нарушения очередности выдачи блоков потребителю информации.

Передающая сторона, получив сигнал «Запрос», прекращает подачу в ПКС новых сообщений и повторяет из БН все комбинации, начиная с той, на которую поступил запрос. Номер запрашиваемого блока определяется по времени поступления сигнала «Запрос». Такие системы называются РОС с непрерывной передачей и блокировкой (РОС-НП-бл). На рис. 8.2 приведены временные диаграммы, иллюстрирующие работу системы РОС-НП-бл при обнаружении ошибки во втором блоке. Передача кодовых комбинаций от ИИ осуществляется непрерывно до момента получения по обратному каналу сигнала запроса (после выдачи пятого блока). Как видно из диаграммы, до момента приема сигнала о повторном запросе  $i$ -го блока в канал будет передано  $W = 4$  блоков. Поэтому минимальная величина емкости БН должна равняться ширине окна  $W$ , причем  $W$  определяется по формуле

$$W = 1 + \lceil t_{\Sigma} / (n_B \tau_0) \rceil,$$

где  $\lceil X \rceil$  - наименьшее целое число больше или равное  $X$ ;

$$t_E = 2t_p + t_{oc} + t_{ab} + t_{aoc};$$

$t_p$  – время распространения сигнала по каналу связи;  $t_p$  – длительность сигнала ОС;

$t_{ab}$ ,  $t_{aoc}$  – время анализа блока и сигнала ОС соответственно;  $\tau_0$  – длительность единичного элемента сигнала прямого канала;  $n_b$  – количество бит в блоке.

После приема сигнала «Запрос» передача данных от ИИ прекращается на время передачи  $W$  блоков (окно закрывается), и кодовые комбинации, начиная со второго блока, и  $W-1$  последующих блоков выдаются из БН передатчика. В это время в приемнике стираются  $W$  блоков: 2-й, в котором обнаружены ошибки (отмечены звездочкой на рисунке 8.2), и три последующих (заштрихованные на рисунке). Получив переданные из БН передатчика блоки (от 2-го до 5-го включительно), приемник выдает их потребителю информации (ПИ), а передающее устройство продолжает передачу 6-го и последующих блоков. Современные канальные протоколы предусматривают семикадровые окна. Это означает, что ООД может посылать семь блоков без получения ответного подтверждения. Для предотвращения вставок и дублирования блоков по причинам, указанным выше, применяют циклическую нумерацию блоков по модулю  $W + 1$ .

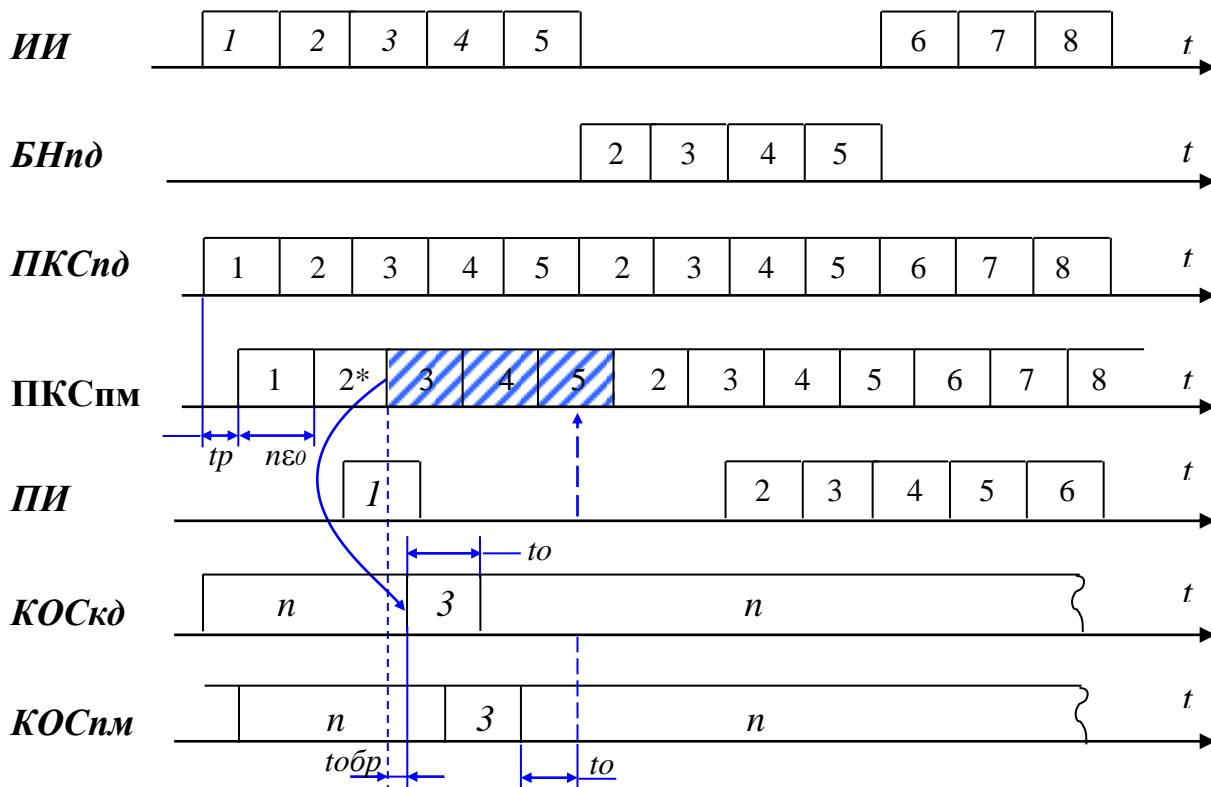


Рисунок 7.2 – Временные диаграммы работы системы передачи данных с РОС-НП

С целью уменьшения объема информации, передаваемой при запросах, разработаны системы с РОС и адресным переспросом (РОС-АП), отличия которых состоит в том что

по обратному каналу передается сигнал запроса, указывающий номера (адреса) ошибочно принятых блоков.

### 7.3. Системы с информационной обратной связью

Системы с ИОС по алгоритму работы подразделяются аналогично системам с РОС на системы с ожиданием (ИОС-ОЖ), системы с непрерывной передачей (ИОС-НП) и системы с адресным переспросом (ИОС-АП). Однако, решение о повторной передаче информации или о ее стирании принимается на передающей стороне. Переданная по ПКС кодовая комбинация, представляющая собой информационный блок, фиксируется на приемной стороне и хранится там до получения сигнала подтверждения. Принятый блок по каналу ОС ретранслируется на передающую сторону, где происходит сравнение его с переданным. Если сравниваемые последовательности совпадают, то передатчик выдает следующий блок, а при несовпадении – в ПКС с передатчика поступает команда «Стирание», и затем повторяется искаженный блок. По сигналу «Стирание» происходит сброс информации в БН приемной части, а на ее место записывается комбинация, приходящая вслед за стиранием.

Недостатком систем с ИОС-ОЖ является большая потеря времени, связанная с ожиданием информационного блока по каналу ОС. Более высокую пропускную способность обеспечивают устройства, в которых блоки данных от источника информации поступают в канал непрерывно до момента обнаружения ошибки. После этого источник останавливается, а из БН выдаются все записанные в нем блоки, начиная с комбинации, где обнаружены ошибки. Такие системы называются системами ИОС с непрерывной передачей (ИОС-НП).

Системы ИОС-НП по сложности реализации соизмеримы с РОС-НП, но обеспечивают вдвое меньшую пропускную способность, так как канал ОС загружен так же, как и прямой. Преимуществом систем с ИОС-НП является отсутствие помехоустойчивого кодирования информационных блоков и в связи с этим исключение кодера и декодера из схемы устройства, а также меньшая загрузка ПКС избыточной информацией. Поэтому ИОС целесообразно применять там, где можно без ущерба для других целей использовать обратный канал при отсутствии существенных ограничений на скорость передачи. Для повышения передачи данных МККТТ рекомендует в симплексных каналах применять многократное повторение одноименных блоков данных. В УЗО с дуплексной передачей следует использовать РОС с непрерывной передачей, а в полудуплексных – РОС с ожиданием подтверждения. Эти рекомендации закреплены в ГОСТ 24734-81.

В некоторых сетях телеобработки применяются относительно простые методы проверки ошибок, возникающие при передаче по каналам связи. Одним из простейших способов является так называемый «эхоплекс», который представляет собой разновидность информационной ОС. В соответствии с этим способом каждый символ, посылаемый ПЭВМ на удаленный пункт, возвращается по каналу ОС в виде «эха».

## 8. Синхронизация в системах передачи данных

### 8.1. Синхронизация по единичным элементам

Для регистрации единичных элементов необходимо вырабатывать последовательность стробирующих импульсов, которые в зависимости от метода регистрации должны располагаться в середине элемента сигнала, или в конце его, либо быть распределенными по единичному интервалу в определенные моменты времени. Очевидно, что для формирования таких импульсов необходимо с заданной точностью определять значащие моменты восстановления. Устройство, осуществляющие измерение временного положения значащих моментов цифровых сигналов и формирующие последовательность стробирующих импульсов, фаза которых устанавливается и поддерживается с учетом наиболее вероятного положения значащих моментов, называется *устройством синхронизации* (УС).

В современной АПД наиболее широко применяются замкнутые УС с дискретным управлением, которые представляют собой разновидность устройств фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Структурная схема УС с дискретным управлением (УСДУ) показана на рисунок 8.1.

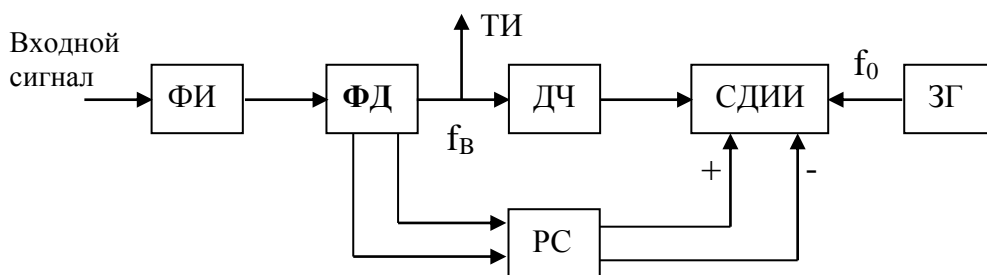


Рисунок 8.1 – Структурная схема устройства синхронизации с дискретным управлением

Формирователь импульсов (ФИ) вырабатывает короткие импульсы, соответствующие значащим моментам цифровых сигналов. Фазовый дискриминатор (ФД) определяет опережение или отставание тактовых импульсов (ТИ) относительно значащих моментов. Устройство управления УСДУ состоит из схемы добавления или исключения импульсов (СДИИ) и реверсивного счетчика (РС) емкостью  $S$ , выполняющего функции усредняющего элемента. Сущность автоматической подстройки фазы заключается в добавлении или исключения импульсов в последовательности, поступающей от задающего генератора ЗГ на делитель частоты ДЧ, который имеет коэффициент деления  $m_\Delta$ . При этом ТИ на выходе ДЧ смещаются во времени на величину  $\Delta\phi/m_\Delta$  соответственно в сторону опережения или отставания. Очевидно, что частота ТИ должна быть в  $m_\Delta$  раз выше скорости модуляции. На рисунке 8.2 показана временная диаграмма функционирования УС при  $m_\Delta = 7$  и  $S = 1$ .

Следует заметить, что в ЧМ- или ФМ-демодуляторах формирователь импульсов ФИ подсоединяется к выходу ФНЧ ЧМ- или ФМ- демодулятора. Форма сигнала в этой точке демодулятора близка к прямоугольной, т. е. тактовые импульсы формируются на основе демодулированных сигналов. Если тактовое колебание необходимо для осуществления процесса демодуляции ФМ- сигналов, то оно не может быть получено с выхода демодулятора. В этом случае можно применять резонансный метод выделения тактовой частоты из принимаемого демодулированного сигнала. Этот метод основан на анализе переходных процессов, возникающих при прохождении ФМ-сигналов через приёмный фильтр. Огибающая сигнала на выходе фильтра при скачках фазы приобретает провал в области между соседними единичными элементами. Для выделения огибающей применяется двухполупериодный выпрямитель и полосовой фильтр, резонансная частота которого совпадает с тактовой частотой передачи.

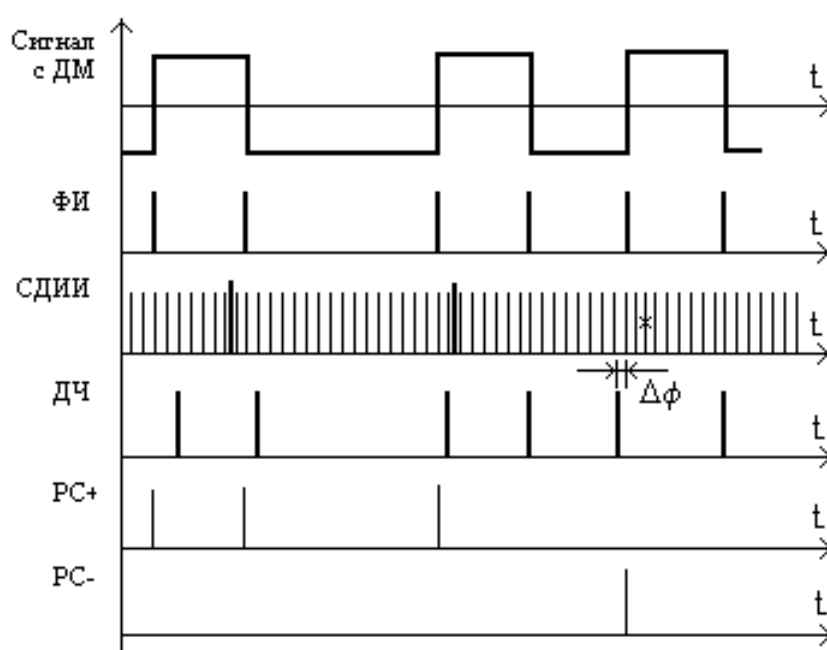


Рисунок 8.2 – Временные диаграммы процесса поэлементной синхронизации

Выделенная огибающая подается на схему УСДУ (рисунок 8.1). Для образования в ФИ коротких положительных импульсов, соответствующих фронтам прямоугольной последовательности сигналов данных, целесообразно использовать схему цифрового дифференциатора-выпрямителя.

К основным параметрам, характеризующим устройство синхронизации с дискретным управлением относятся:

- **Шаг коррекции  $\Delta\phi_k$**  – относительная величина смещения фазовых тактовых импульсов на выходе ДЧ при добавлении или исключении одного импульса  $\Delta\phi_k = \Delta t / \Delta\tau_0 = 1 / m_\phi$ .

▪ **Коррекционный эффект  $g_k$**  – коэффициент, характеризующий степень смещения фазы ТИ в зависимости от величины рассогласования фаз. Коэффициент  $g_k$  может принимать значение от 1 до  $r_3$  при условии  $r_3 < m_\partial$ .

▪ **Угол коррекции  $\varphi_k$**  – относительное смещение фазы ТИ при регистрации одного значащего момента  $\varphi_k = g_k \Delta\varphi_k$ .

▪ **Минимальный период корректирования  $t_{k \min}$**  – наименьшее время, в течение которого корректирование не производится, т. е. минимальный интервал между соседними корректирующими воздействиями. При передаче «точек» это время равно произведению емкости реверсивного счетчика  $S$  на длительность единичного элемента  $\tau_0$ , т.е.

$$t_{k \min} = S \tau_0 = S/B.$$

▪ **Максимальное расхождение фаз  $\Delta\varphi_\Gamma$** , обусловленное нестабильностью генераторов на передающей и приемной сторонах, численно определяемое как относительное смещение фазы ТИ за  $t_{k \min}$  при приеме «точек»:

$$\Delta\varphi_\Gamma = k_f t_{k \min} / \tau_0 = 2k_f S,$$

где  $k_f$  – коэффициент нестабильности опорного генератора в относительных единицах.

▪ **Погрешность (точность) синхронизации  $\varepsilon_c$**  – величина, характеризующая наибольшее отклонение фазы тактовых импульсов (синхросигналов) от их оптимального положения, которое с заданной вероятностью может произойти при работе УС. Погрешность синхронизации включает в себя статическую  $\varepsilon_{ст}$  и динамическую  $\varepsilon_{дин}$  составляющие, причем

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{ст} + \varepsilon_{дин}.$$

▪ **Статическая погрешность  $\varepsilon_{ст}$**  представляет собой фазовое отклонение ТИ, выраженное в долях единичного элемента  $\tau_0$ , при приеме неискаженной по длительности последовательности цифровых сигналов. Величина  $\varepsilon_{ст}$  определяется параметрами УС-ДУ:  $\varepsilon_{ст} = \Delta\varphi_k + \Delta\varphi_\Gamma$ , где  $\Delta\varphi_k = 1/m_\partial$  – шаг коррекции;  $\Delta\varphi_\Gamma = 4k_f S$  – относительное смещение фазы синхроимпульсов из-за нестабильности генераторов на передающей и приемной сторонах. Отсюда

$$\varepsilon_{ст} = 1/m_\partial + 4k_f S.$$

▪ **Динамическая погрешность** характеризует фазовое отклонение синхроимпульсов, выраженное в долях  $\tau_0$ , вызванное искажениями по длительности единичных элементов (смещениями значащих моментов). Как правило, динамическая погрешность при достаточно большом коэффициенте деления делителя ( $m_\partial \geq 100$ ) подчинена нормальному закону распределения с дисперсией

$$\sigma_\varepsilon^2 = \sqrt{\pi/2} \delta_{кв} / (2Sm_\partial) = 0.628 \delta_{кв} / (Sm_\partial).$$

С вероятностью, близкой к единице, можно утверждать, что динамическая погрешность не превысит утроенного среднеквадратичного значения  $\sigma_\varepsilon$  (правило «трех сигм»), т. е.

$$\varepsilon_{\text{дин}} = 3\sigma_{\varepsilon} = 3\sqrt{0.628\delta_{\text{кг}}/(Sm_{\delta})}.$$

С учетом сказанного выражение для общей погрешности может быть представлено в виде

$$\varepsilon_{\text{ст}} = 1/m_{\delta} + 4k_f S + 3\sqrt{0.628\delta_{\text{кг}}/(Sm_{\delta})}.$$

▪ **Время синхронизации  $t_c$**  – время, время необходимое для корректирования первоначального расхождения фаз  $\Delta\varphi$  между ТИ и значащими моментами входящей информационной последовательности. Для УС с постоянным коррекционным эффектом  $t_c$  рассчитывается по формуле

$$t_c = S m_{\delta} \tau_0 = S m_{\delta} / B.$$

▪ **Время поддержания синхронизма  $t_{nc}$**  – время в течение которого фаза синхросигналов не выйдет за пределы допустимого рассогласования  $\varepsilon_{\text{доп}}$ :

$$t_{nc} = \varepsilon_{\text{доп}} / 2k_f B.$$

Характеристики приемного устройства в значительной степени зависят от погрешности синхронизации, в частности эффективная исправляющая способность приемника при краевых искажениях сигналов определяется в основном погрешностью УС, а именно:

$$\mu_{\text{эф}} = \mu_{\text{т}} - \varepsilon_{\text{с}} - \delta_{\text{пр}} = (\tau_0 - t_{\text{уп}}) / (2\tau_0) - \varepsilon_{\text{с}} - \delta_{\text{пр}},$$

где  $t_{\text{уп}}$  – длительность импульса регистрации;  $\mu_{\text{т}} = 0.5$  – теоретическая исправляющая способность. В современных приемниках  $t_{\text{уп}} \leq 0.005 \tau_0$ . Следовательно, можно с достаточной для практики точностью записать,

$$\mu_{\text{эф}} \approx 0.5 - \varepsilon_{\text{с}} - \delta_{\text{пр}}.$$

## 8.2. Цикловое фазирование в СПД

### 8.2.1. Общая характеристика

Для правильного декодирования сообщений в УЗО необходимо знать начало блока информации (цикла). При этом между распределителями передающей и приёмной сторон должно быть установлено такое фазовое соотношение, при котором первый передаваемый в канал связи бит направляется в первую ячейку приёмного буфера, второй – во вторую и т. д. Процесс принудительного установления необходимого фазового соотношения называется *фазированием по циклам* или групповым фазированием. Для осуществления циклового фазирования на приёмной стороне необходимо иметь сведения о фазе передающего распределителя. В отличие от элементарной синхронизации эти сведения следует посылать на приёмную часть АПД в начале передачи, либо в течение всего сеанса связи. Способы фазирования можно разделить на две группы:



- **Безмаркерные** (с одноразовым запуском), при которых во время передачи информационного сообщения фазирующие сигналы (*маркеры*) не передаются, а фазирование осуществляется за счёт выдачи в канал специальной фазирующей последовательности перед началом передачи сообщения и в паузах между поступлениями отдельных блоков информации;

- **Маркерные** (с непрерывной синхронизацией), при которых в течение всего сеанса связи по каналу совместно с информационными сигналами передаются специальные кодовые комбинации (маркеры), используемые для фазирования АПД по циклу.

В свою очередь маркерный способ фазирования подразделяется на синхронный и стартстопный. В первом – циклы фиксированной длины следует непрерывно друг за другом, в связи с чем их начало и конец в сфазированном приёмнике известны заранее.

При стартстопном способе цикл может начинаться в произвольный момент времени, а длина его – быть произвольной. В промежутках между выдачей блоков передающей и приёмный распределители находятся на «стопе». Запуск их происходит под действием команды «Старт», подаваемой перед блоком в канал. Команды «Старт» может быть представлена отдельным сигналом, либо кодовой комбинацией.

Для начального установления синфазного состояния распределителей на передающей и приёмной сторонах, а также для контроля за синфазностью переключения их в процессе передачи данных, в УЗО имеются специальные *устройства фазирования по циклам* (УФЦ). Независимо от способа фазирования любая схема УФЦ содержит блок ввода в передаваемую последовательность маркерной комбинации на передающей стороне и блок выделения этой комбинации в приёмнике. Схема устройства фазирования по циклам, входящая в приёмную часть АПД, изображена на рисунке 8.3. В её состав входят блок выделения маркерной комбинации (БМК), блок защиты схемы фазирования от помех (БЗФ), возникающих в канале связи, и блок установки приёмного распределителя (БУР) в синфазное состояние с распределителем передающей части УЗО. Данные, поступающие с выхода УПС под действием тактовых импульсов (ТИ), проходят через БМК, который фиксирует появление маркерного символа в приёмном сообщении и выдаёт соответствующий импульс на схему установки распределителя. БУР выполняет начальную установку непосредственно, либо путём воздействия на частоту следования тактовых импульсов, управляющих переключением распределителя, восстанавливая таким образом синфазность между передающим и приёмным распределителями.

Поиск синхронизирующей комбинации как для маркерных, так безмаркерных способов производится путём непрерывного анализа всей поступающей информации до тех пор, пока не обнаружится фазирующий признак, либо методом однократной проверки за каждый цикл в определённый момент группы единичных элементов, предлагаемых фазирующим символом. В первом случае УФЦ воздействует на приёмный распределитель только после обнаружения маркера и устанавливает этот распределитель в исходное состояние, а во втором – осуществляет дополнительный сдвиг распределителя на один шаг в сторону опережения или отставания после завершения каждого цикла. Если в первом варианте маркер обнаруживается за один цикл, то во втором случае – может потребоваться  $n_6$  циклов, где  $n_6$  – количество единичных элементов, передаваемых в блоке, т.е. время фазирования в системах с непрерывным анализом маркера меньше, чем в устройствах с однократной проверкой.

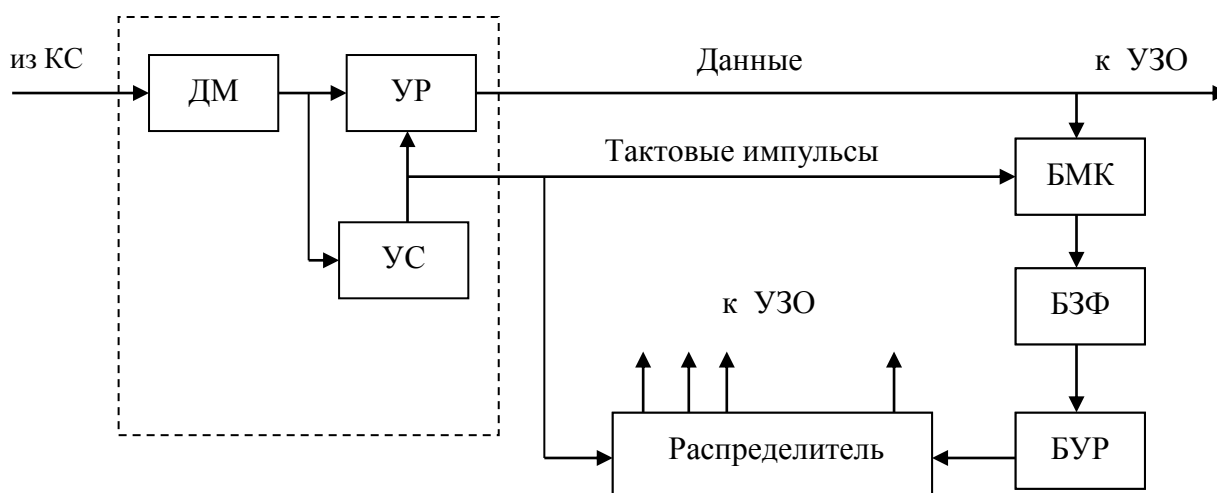


Рисунок 8.3 – Схема устройства фазирования по циклам

Основными параметрами УФЦ является время фазирования  $t_{\text{ф}}$ , вероятность ложного фазирования  $P_{\text{лф}}$ , то есть вероятность того, что искаженная фазирующая комбинация зафиксирована ошибочно, и вероятность пропуска  $P_{\text{пр}}$  синхросимвола. Устройства фазирования проектируются таким образом, чтобы минимизировать значения  $t_{\text{ф}}$ ,  $P_{\text{лф}}$  и  $P_{\text{пр}}$ . Вероятность ложного фазирования уменьшается при введении устройства защиты, включающего установку приёмного распределителя в нужное состояние только при условии регистрации маркерной комбинации несколько ( $v$ ) раз. Тогда вероятность ложного фазирования равна  $P_{\text{лф}v} = P_{\text{лф}1}^v$ , где  $P_{\text{лф}1}$  – вероятность ложного фазирования при приёме маркерной комбинации только один раз. Уменьшение вероятности пропуска маркера достигается выбором длины и структуры синхронизирующей комбинации.

### 8.2.2. Безмаркерные способы циклового фазирования

Упрощённая структурная схема УФЦ для реализации безмаркерного способа с передачей маркерной (пусковой) комбинации и непрерывным анализом информации показана на рисунках 8.4 и 8.5. В АПД с безмаркерным способом фазирования имеется два режима работы: «Фазирование» и «Данные». Формат блока в режиме фазирования изображен на рисунке 8.6б, а в режиме передачи данных – на рисунке 8.6а.

При передаче данных  $n_1$  разрядов выделяется для передачи номера блока,  $n_2$  – для информационного сообщения,  $n_3$  – для служебной (избыточной) информации. В режиме фазирования на месте номера блока передаётся признак синхроблока,  $n_2$  временных позиции используется для передачи сигналов с максимальным числом переходов из 0 в 1 – типа «точки» (1:1), которые используются для синхронизации УПС по единичным элементам. На месте избыточной информации располагается фазирующая комбинация – маркер длиной  $n_3$  разрядов. Такой формат синхроблока позволяет с минимальными схемотехническими затратами переключать АПД с режимами фазирования в режим данных.

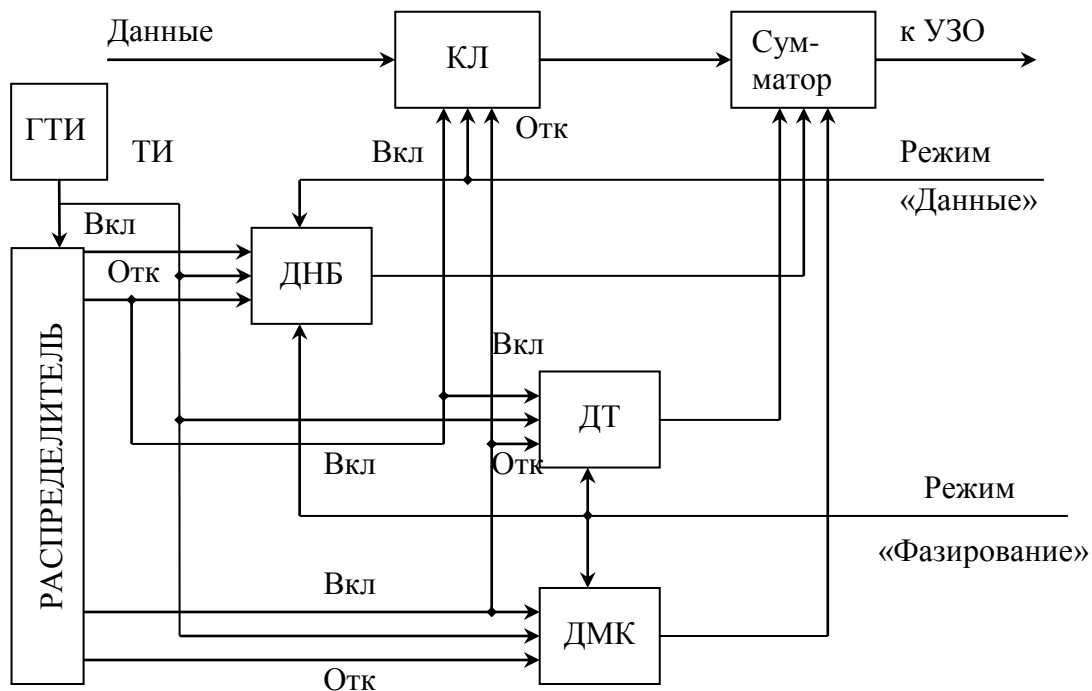


Рисунок 8.4 - Схема устройства фазирования по циклам передающей части

Устройство функционирует следующим образом. На передающей стороне (рисунок 8.4) распределитель переключается сигналами, поступающими с генератора тактовых импульсов ГТИ, которые используются также для тактирования всех блоков передатчика. В режиме «Фазирования» ключевая схема Кл закрыта, и информация от ООД-источника к УЗО и далее в канал связи не поступает. В активном состоянии находятся датчик маркерной комбинации и датчик «точек» ДТ, а в датчик номера блока ДНБ заносится признак синхроблока. В начале цикла импульс с первого выхода распределителя включает ДНБ, и комбинация признака фазирования под действием тактовых импульсов в течении  $n_1$  тактов выводится через элемент ИЛИ в канал. По окончании  $n_1$  – й временной позиции ДНБ отключается, и этим же импульсом включается датчик «точек» ДТ. В течение  $n_2$  тактовых импульсов в канал передается последовательность 1 и 0, после чего ДТ отключается, и включается датчик маркерной комбинации ДМК. После завершения цикла процесс повторяется и продолжается до тех пор, пока АПД находится в режиме фазирования. При односторонней передаче количество циклов фазирования определяется состоянием канала и формируется специальным счетчиком (на схеме не показан), а при дуплексной передаче АПД находится в состоянии фазирования до тех пор, пока по каналу обратной связи не поступит подтверждение о том, что приемный распределитель сфазировался.

На приемной стороне (рисунок 8.5) демодулированная последовательность с выхода УПС под действием тактовых импульсов ТИ продвигается через регистр маркерной комбинации РгМК, к выходу которого подключен дешифратор маркерной комбинации ДшМК. На каждом такте ТИ происходит опрос ДшМК, и при наличии на его входе фазы-

рующей комбинации, свидетельствующей об окончании цикла, на выходе дешифратора появляется единичный импульс, устанавливающий распределитель на начальное состояние.

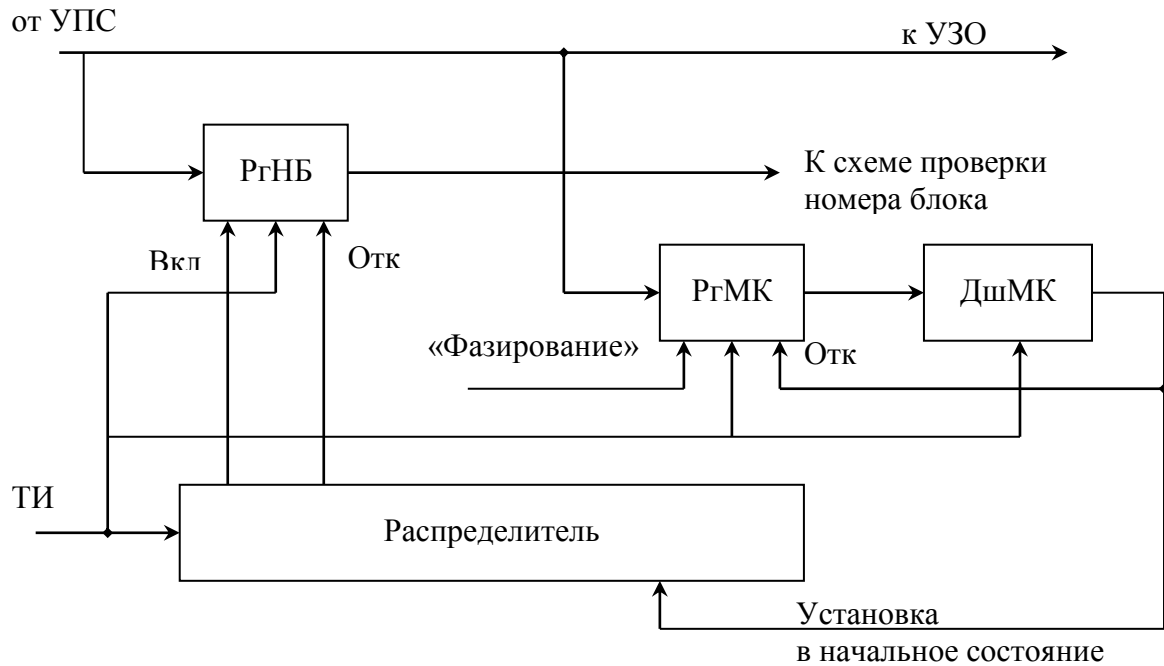


Рисунок 8.5 – Схема устройства фазирования по циклам приемной части

Срабатывание ДшМК может произойти под действием помех, в результате которых поступающая кодовая комбинация преобразуется в маркерную.

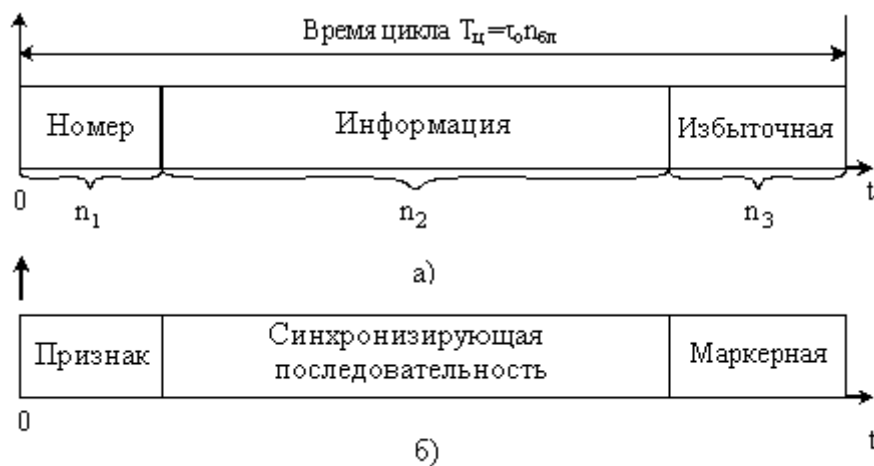


Рисунок 8.6 – Форматы блока в режимах: а) – передачи данных; б) - фазирования

Для предотвращения этого в устройство фазирования вводится блок защиты (рисунок 8.3), срабатывающий при обнаружении маркерной комбинации несколько раз подряд (обычно 2 – 4) на тех временных позициях, где ей надлежит быть. После обнаружения

маркера и установки распределителя приемник переключается в режим «Данные» и сообщает об этом по каналу обратной связи на передающую сторону.

Безмаркерный способ находит широкое применение в современной аппаратуре передачи данных и сетевых картах ПЭВМ благодаря малому времени асинхронизм, высокой пропускной способности за счёт исключения маркерных слов из текста сообщения во время передачи данных. Недостатком такого способа базирования является отсутствие постоянного контроля за синфазностью работы распределителей.

### 8.2.3. Маркерный способ фазирования

Один из вариантов реализации маркерного способа фазирования по циклам с однократной проверкой и пошаговым сдвигом распределителя за цикл изображен на рисунке 8.7. Структура передаваемого сообщения показана на рисунке 9.8.

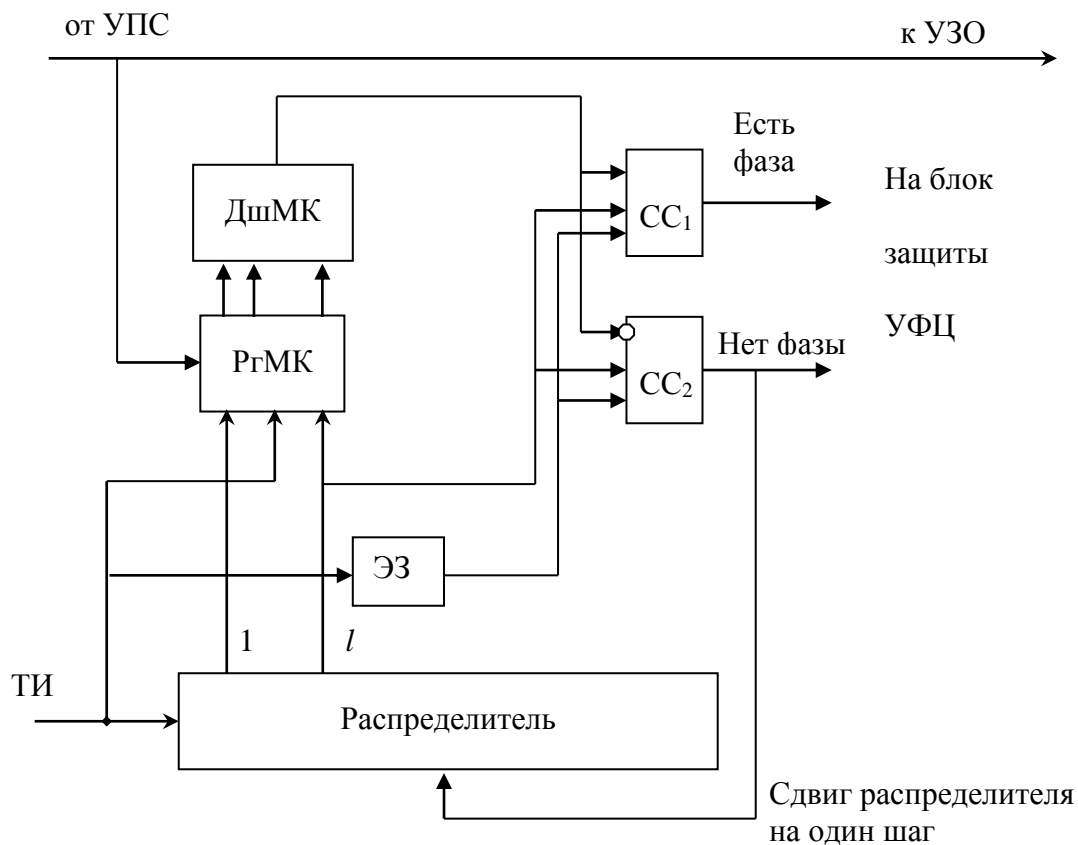


Рисунок 8.7 – Схема маркерного устройства фазирования по циклам

На первых  $l$  временных позициях передается  $l$  – разрядная маркерная комбинация. Для её приёма и хранения используется регистр РгМК, запись в который осуществляется импульсом с первого выхода распределителя, прекращается – по окончании  $l$ -го импульса, соответствующего  $l$ -й временной позиции, задаваемой приемным распределителем. Для обнаружения фазирующей последовательности используется дешифратор маркерной комбинации ДшМК, опрос которого производится по окончании времени приема марке-

ра импульсом, смещённым относительно ТИ. Импульсы опроса ДШМК формируются элементом задержки ЭЗ, осуществляющим сдвиг ТИ на время  $\tau_0/2$ . Если приёмный распределитель переключается не синфазно с передающим, то в момент  $l$ -го импульса в РГМК будет находиться произвольная кодовая комбинация, а на выходе ДШМК – нулевой уровень, приводящий к появлению на входе первой схемы совпадения СС<sub>1</sub> нулевого потенциала. Логический 0 с ДШМК из-за инверсии на входе схемы совпадения СС<sub>2</sub> подготавливает ее к выдаче сигнала «Нет фазы», который появляется в середине  $l$ -й временной позиции за счет импульса, поступающего с элемента задержки ЭЗ. Импульс с выхода СС<sub>2</sub> дополнительно смещает фазу приёмного распределителя на один шаг в сторону опережения. Подстройка фазы приёмного распределителя осуществляется до тех пор, пока в РГМК не окажется искомая маркерная комбинация. Тогда «1» с ДШМК запрещает формирование импульса подстройки фазы и пропускает ТИ через СС<sub>1</sub>, сигнализирующий о наличии синфазности переключения распределителей.

Сигналы «Есть фаза» и «Нет фазы» могут быть использованы в блоке защиты УФЦ от помех; дополнительный сдвиг распределителя блок защиты разрешает только в том случае, если маркерная комбинация не обнаружена несколько циклов подряд. Эти же импульсы используются для управления каналов обратной связи.

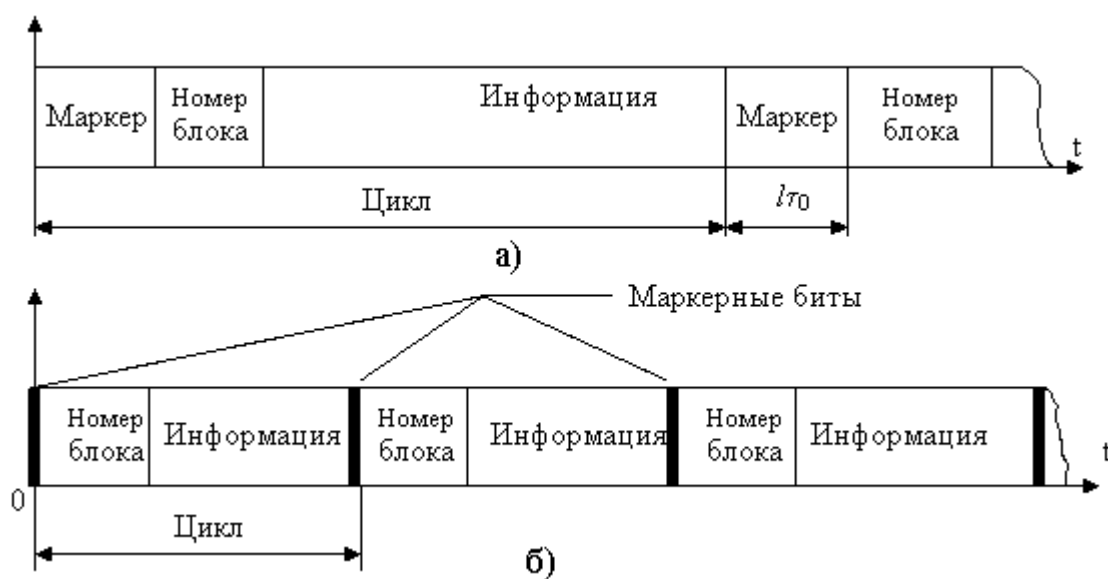


Рисунок 8.8 – Формат блоков при маркерном способе фазирования:

а) – с передачей всего маркера за цикл; б) – с побитной передачей

Преимущество маркерного способа является непрерывный контроль за синфазностью распределителей, а существенным недостатком – большее время вхождения в синхронизм.

В стартстопных системах передачи данных передающий и приемный распределители в паузах между передачей сообщений не переключаются (находятся на «стопе»). Перед передачей каждого символа передатчик формирует сигнал «Старт», который отличается от других сигналов временным признаком. Стартовый сигнал выделяется на прием-

ной стороне соответствующим различителем, который запускает приемный распределитель. Преимуществом стартстопных устройств является немедленное вхождение в фазу, произвольность момента начала передачи кодовых комбинаций, длина которых может быть переменной. Недостаток этого способа фазирования заключается в относительно высокой избыточности за счет передачи с каждой кодовой комбинацией трех бит (один стартовый и два стоповых), а также низкой помехоустойчивости передачи информации, так как искажение стартового и стопового элемента может привести к полному искажению принимаемого блока символов.

## 9. Архитектура и протоколы компьютерных сетей

### 9.1. Обобщенная структура компьютерных сетей

*Компьютерная сеть* представляет собой совокупность взаимосвязанных технических средств и программного обеспечения, предназначенных для распределенной обработки данных, а также для обмена и передачи данных между любыми пользователями (абонентами) сети. В состав технических средств входят множество персональных компьютеров и серверов, а также узлов коммутации и распределения информации, соединенных между собой каналами передачи данных. Информационный поток данных, передаваемых между компьютерами сети, называется *сетевым трафиком* или просто **трафиком** (*traffic*). Программное обеспечение включает сетевые операционные системы, управляющие работой компьютеров в сети, а также пакеты программ, обеспечивающих передачу и установление соединений между пользователями сети, маршрутизацию и оптимальное распределение потоков сообщений между узлами, передачу управляющих сообщений между узлами и конечными пользователями, контроль и учет функционирования сети.

В общем виде компьютерная сеть может быть представлена в виде совокупности *оконечных пунктов* (ОП) и *промежуточных узлов коммутации* (УК), соединенных между собой *каналами и линиями связи* (рисунок 9.1) .

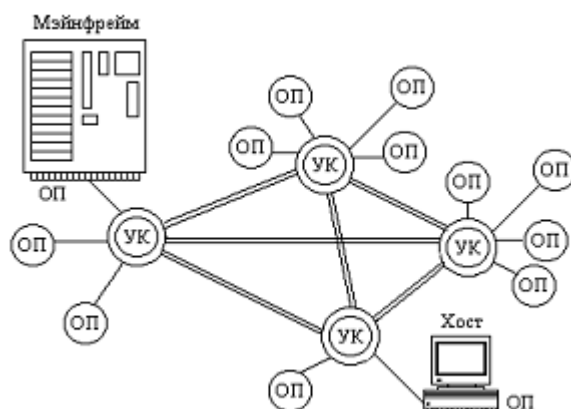


Рисунок 9.1 - Обобщенная структурная схема компьютерной сети

Оконечным узлом компьютерной сети является, как правило, компьютер с устройством передачи данных, хотя в принципе к сети могут быть подключены и другие типы источников и потребителей цифровой информации. Компьютер оконечного пункта объединенных сетей в литературных источниках часто называют также **хостом** (*Host*), а большую (главную) ЭВМ сети - **мэйнфреймом** (*Mainframe*). В локальных компьютерных сетях оконечный пункт обычно называют «Рабочая станция». Совокупность двух узлов сети, соединенных каналом передачи данных получил название **звено данных** (*Data Link*).



Узлы коммутации позволяют осуществить обмен информацией между любыми конечными пунктами сети за счет установления между ними связи на время передачи данных путем соединения (коммутации) участков линий сети в единый тракт. После завершения обмена данными эти же участки линий могут быть использованы для организации тракта обмена между другими ОП. Таким образом, наличие в сети узлов коммутации позволяет более эффективно использовать дорогостоящие линии и линейное оборудование сети путем их максимальной загрузки.

Другим вариантом построения единой компьютерной сети является объединение независимых сетей, так называемых *подсетей (Subnet)* отдельных регионов или организаций с помощью узлов коммутации, роль которых выполняют маршрутизаторы (М) или шлюзы (рисунок 9.2). Объединенная сеть в англоязычной литературе получила название Internetwork или сокращенно **Internet**.

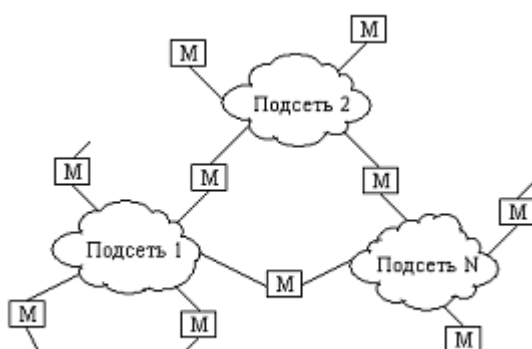


Рисунок 9.2 – Структура объединенной компьютерной сети Интернет

Компьютерные сети (КС) классифицируют по назначению, составу оборудования, программному обеспечению и функциональным возможностям, по пространственному расположению и способу установления соединения, а также по ряду других признаков.

По функциональному назначению различают вычислительные, информационные, информационно-вычислительные и информационно-управляющие сети.

**Вычислительные** сети предназначены главным образом для решения задач пользователей с распределением ресурсов между компьютерами сети. **Информационные** сети ориентированы в основном для предоставления информационного обслуживания по запросам пользователей. **Информационно-вычислительные** сети объединяют функции вычислительных и информационных сетей. **Информационно-управляющие** сети осуществляют сбор оперативной информации, осуществляют ее обработку и принимают решение по управлению объектами или процессами, распределенными в пространстве. В настоящее время большинство сетей являются информационно-вычислительными.

По назначению различают компьютерные сети общего пользования (универсальные), обслуживающие круг разнообразных пользователей и специализированные сети. К последним следует отнести сети управления производством и учрежденческие.

По типу используемых компьютеров различают однородные (**гомогенные**) сети, содержащие программно-совместимые компьютеры, и разнородные (**гетерогенные**).

По расположению в пространстве различают локальные и глобальные сети. **Локальные сети (LAN-Local Area Networks)** ограничены территорией одного помещения, цеха или предприятия. Характерной особенностью локальных сетей является использование в качестве среды передачи сигналов высококачественных электрических, оптических или иных линий связи, причем длина линии связи не превышает нескольких километров. Передача данных в LAN **осуществляется со скоростью** от 10 Мбит/с до нескольких тысяч Мбит/с. Локальные сети чаще всего являются однородными. В настоящее время на практике наиболее широко используются следующие локальные сети: **Ethernet**, **Fast-** и **Gigabit Ethernet**, **Token Ring** и **FDDI (Fiber Distributed Data Interface)**.

**Глобальные сети (WAN – Wide Area Networks)** расположены на большой территории (населенный пункт, область, государство). К характерным особенностям таких сетей относится использование для передачи данных каналов связи общего пользования (телефонных, первичных широкополосных и каналов более высокого порядка, цифровых каналов связи различных порядков и т.д.). Скорости передачи данных в глобальных сетях сравнительно невысокие и лежат в пределах 56 – 2000 кбит/с. Кроме этого, каналы глобальных сетей характеризуются относительно высоким уровнем помех, что требует применения специальных мер защиты от ошибок. Глобальные сети в принципе являются разнородными. Примерами глобальных сетей являются: компьютерная сеть **SNA (Systems Network Architecture)** для передачи информации в сетях фирмы **IBM**; сеть с ретрансляцией пакетов **Frame Relay**; объединенная мировая компьютерная сеть **Internet** и ряд других.

В последнее время в отдельный вид выделяют *городские* и *корпоративные сети*. Городские сети (**MAN – Metropolitan Area Networks**) предоставляют сетевые услуги на территории крупных городов. Они объединяют локальные сети различных организаций города, а также обеспечивают соединения с глобальными сетями. Городские сети для внутренних пересылок данных используют цифровые магистральные каналы связи на основе волоконно-оптических линий со скоростью передачи от 45 Мбит/с и выше. Городские сети - преимущественно разнородные. *Корпоративные сети* являются сетями масштаба предприятия, объединяющие подсети отдельных подразделений организации, расположенных территориально в разных частях населенного пункта, страны или континента. Для передачи информации между подсетями используются линии и каналы связи, применяемые как в локальных, так и глобальных сетях. В общем случае корпоративная сеть имеет гетерогенный характер.

По способу установления соединений между взаимодействующими оконечными пунктами различают сети с постоянным включением каналов связи (некоммутируемые сети), сети с коммутацией каналов и сети с коммутацией сообщений и пакетов. В **сетях с коммутацией каналов** пользователи соединяются сквозными физическими или логическими каналами только на время обмена информацией. В **сетях с коммутацией сообщений** передача информации осуществляется без предварительного соединения взаимодействующих узлов. В этих сетях сообщение от отправителя поступает на узел коммутации сообщений, где запоминается (ставится на очередь) и передается по указанному адресу в

соответствии с категорией срочности. Если необходимые участки сети заняты, то сообщения хранятся на узлах до освобождения канала связи или очередного узла. Под сообщением понимается логически завершенная последовательность данных – запрос на передачу файла, ответ на этот запрос, содержащий весь файл и т.п. Сообщения могут иметь произвольную длину – от нескольких байт до многих мегабайт. **Сеть с коммутацией пакетов** является разновидностью сети с коммутацией отрезков сообщений (пакетов), длина которых составляет от десятков до нескольких тысяч байтов. **Пакет** представляет собой последовательность байтов, состоящей из заголовка с управляющей информацией и данных, передаваемой через сеть как минимальная независимая единица сообщения.

В зависимости от *способа взаимодействия* различают сети с **независимыми** (равноправными) **сторонами** (*Peer-to-Peer* сети) и сети, взаимодействующие по модели **"клиент-сервер"**. В первом типе каждая из сторон может выступать в роли ведущей, начинающей работу путем отправки иницилирующего сообщения или запроса на обслуживание. В сетях с использованием модели "клиент-сервер" активной, запрашивающей стороной является клиент, а сервер постоянно находится в состоянии ожидания запроса. Он выполняет информационную услугу только в ответ на запрос клиента.

По функциям *управления сетевыми ресурсами* компьютерные сети делят на централизованные и децентрализованные. В **централизованных** сетях управление всеми сетевыми ресурсами осуществляет один из ее узлов (сервер). Для **децентрализованных** сетей характерно автономное распределение ресурсов, при котором каждый из узлов, используя информацию о состоянии сети, самостоятельно определяет возможность доступа к ее ресурсам.

В зависимости от *прав собственности* на сети последние могут быть **сетями общего пользования** (*public*) или **частными** (*private*). Так к сетям общего пользования относятся телефонные сети ТфОП (PSTN - *Public Switched Telephone Network*) и сети передачи данных (PSDN- *Public Switched Data Network*).

В последнее время появился термин **интеллектуальная сеть** (*intelligent network*). Под этим термином понимается коммуникационная сеть, которая кроме передачи данных, предоставляет *дополнительный информационный сервис*. Наряду с традиционными компонентами (узлы коммутации, мультиплексоры, центры управления) интеллектуальная сеть содержит сервисные центры, базы данных, узлы создания услуг, позволяющие оказывать пользователям всевозможные информационные услуги, перечень которых постоянно расширяется. Интеллектуальная сеть является некоторой надстройкой, обеспечивающей применение интеллектуальных технологий для обработки запросов пользователями услуг на получение дополнительного сервиса.

По роду деятельности в сети различают **оператора сети** (*Network Operator*) и **поставщика сетевых услуг** (*Service Provider*). Оператором сети является компания, которая поддерживает сеть в рабочем состоянии. Поставщиком услуг (*провайдером*) называют компанию, оказывающую платные услуги абонентам сети. В ряде случаев владелец, оператор и провайдер могут относиться к одной компании.

## 9.2 Топология компьютерных сетей

Каждая сеть имеет свою **топологию**, т.е. схему пространственного расположения узлов и связей между ними. Наиболее характерные топологические структуры компьютерных сетей изображены на рисунке 9.3.

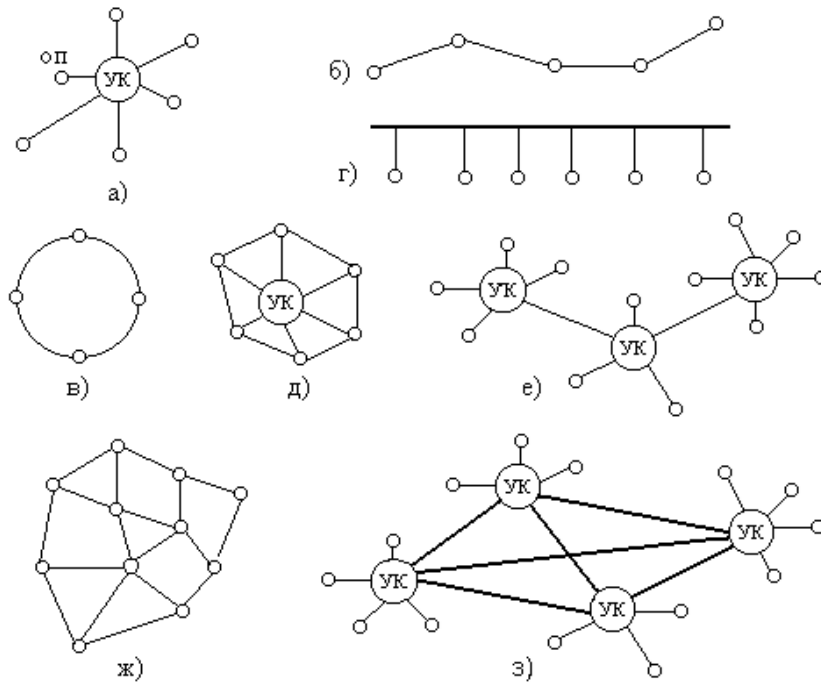


Рисунок 9.3 – Топология компьютерных сетей

К ним относятся: а) лучевая (радиальная или звездная); б) линейная; в) кольцевая; г) шинная; д) радиально-кольцевая; е) радиально-узловая; ж) сеточная; з) многосвязная.

Использование на практике той или иной топологии сети определяется расположением компьютеров и серверов (узлов коммутации) в пространстве, с учетом максимальной надежности сети и минимальных аппаратных затрат. Так, например, для предприятий управления магистральными газопроводами, линиями передачи электрической энергии или железнодорожной связи характерна линейная или радиально-узловая топология. Для локальных сетей наиболее целесообразной являются шинная, лучевая или кольцевая топологии. Для глобальных сетей характерна многосвязная или сеточная топология.

В зависимости от способа соединения звеньев сети между собой, различают **двухточечные** (рисунок 9.4,а) и **многоточечные** (рисунок 9.4,б) соединения.

В двухточечных соединениях (*Point to Point*) информация от источника поступает на один приемник, а в многоточечных к линии передачи подключен ряд приемных устройств. Причем, информация в многоточечных подключениях может передаваться одновременно всем приемникам - **широковещательная** передача (*broadcasting*), части приемников – **групповая** передача (*multicasting*), либо любому приемнику по выбору – **адресная** передача (*unicasting*). Как видно из рисунка 9.3, для компьютерных сетей, за

исключением шинной топологии, характерно использование двухточечных соединений.



Рисунок 9.4 – Двухточечное а) и многоточечное б) соединения звеньев сети

В процессе функционирования компьютерной сети кроме реализации функций обмена информацией необходимо также осуществлять управления сетью. Основные функции управления и организации сети сводятся к следующему:

- установление необходимых физических и логических соединений между взаимодействующими компьютерами;
- решение задач, связанных с адресацией и маршрутизацией передаваемых сообщений;
- контроль и исправление ошибок при передаче данных по линиям и каналам связи, сжатие и защита информации;
- управление взаимодействующими пользовательскими программами;
- управление программами из состава математического обеспечения сети, реализующими различные виды информационных и вычислительных услуг;
- обеспечение конфигурации сети и состава ее технических и частично программных средств без нарушения функционирования сети в целом;
- обеспечение защиты сети от проникновения злоумышленников и нарушения ее функционирования.

Взаимодействие отдельных участков и компонентов компьютерной сети осуществляется по определенным правилам, которые называют **протоколами**.

### 9.3. Эталонная модель взаимодействия открытых сетей

Компьютерная сеть (КС) представляет собой сложную систему, элементами которой являются разнообразные аппаратные и программные средства. Для согласования взаимодействия ЭВМ, каналов связи, аппаратуры передачи данных (АПД), мостов и маршрутизаторов и пр. необходимы правила взаимодействия этих средств на различных уровнях. При этом правила взаимодействия различных уровней должны быть взаимонезависимыми.

На основе опыта разработки и эксплуатации компьютерных сетей в различных странах международной организацией по стандартизации МОО (англ. *ISO - International Standard Organization*), была разработана **Эталонная модель взаимодействия открытых систем** (ВОС), принятая в качестве международного стандарта (*OSI – Open Systems Interconnection*). Суть эталонной модели ВОС заключается в том, что она унифицированным образом описывает принципы взаимодействия разнообразных сетевых систем друг с другом.

Термин "открытые" относятся к системам, удовлетворяющим требованиям стандарта МОС по взаимосвязи. Т.е. если две системы используют один и тот же стандарт, то они "открыты" друг для друга. Реальная открытая КС представляется для пользователя, взаимодействующего с ней, единым стандартным образом, который не зависит от аппаратных особенностей ЭВМ, языков программирования, типов операционных систем и т.д.

В соответствии с этой моделью сеть ЭВМ делится на ряд функциональных системных слоев – **уровней**. Каждый уровень состоит из объектов, выполняет определенную логическую функцию и обеспечивает определенный перечень услуг (сервис) для расположенного над ним уровня. Разбивка сложной системы на уровни позволяет разделить ее на ряд модулей, определить и стандартизировать функции каждого из модулей и интерфейсов между ними. Это приводит к упрощению проектирования системы в целом за счет возможности разработки и реализации каждого из модулей параллельно независимыми организациями, а модификация отдельных модулей может осуществляться без изменения остальной части системы.

МОС рекомендовала к использованию *семиуровневую* иерархию взаимодействия (рисунок 9.5). Взаимосвязь одноименных уровней компьютерной сети определяется стандартными для всей сети правилами. Объекты, выполняющие функции уровней, реализуются программным, программно-аппаратным или аппаратным способом. Как правило, чем ниже уровень (ближе к физической среде передачи), тем больше доля аппаратной части в его реализации.

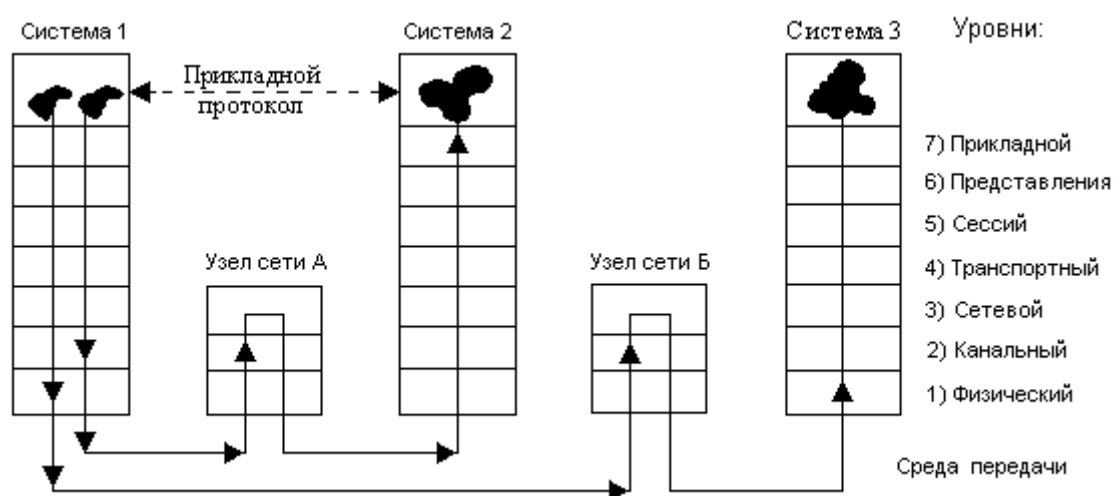


Рисунок 9.5 - Структура эталонной модели ВОС

Обмен данными между уровнями осуществляется информационными пакетами определенного формата. В каждом пакете наряду с данными содержится управляющая информация, размещенная в заголовках. При движении пакета сверху вниз по уровням (передача в сеть) каждый уровень добавляет к пакету свой заголовок. При движении пакета снизу вверх (прием из сети) каждый уровень обрабатывает пакет согласно управляющей информации в заголовке, добавленным к пакету соответствующим уровнем передающей стороны. Таким образом, одинаковые уровни на разных системах общаются между собой по определенным правилам, называемым **протоколами**. Вложенный набор

уровней образует набор протоколов, получивших название "**стеком протоколов**". Правила взаимодействия смежных уровней одной и той же ЭВМ определяют *межуровневой интерфейс*.

Программа, реализующая функцию того или иного протокола, называется *модулем*, например, "транспортный модуль", "сетевой модуль" и т.д. Программные модули выполняют функции сервера и клиента. В роли сервера модуль ожидает запроса от выше- или нижележащего уровня на выполнение определенной услуги (сервиса). По завершению обработки очередного запроса модуль сам становится клиентом, посылая запрос на один из смежных уровней.

Границы между уровнями устанавливаются таким образом, чтобы взаимодействие между смежными уровнями было минимальным и изменения, проводимые в пределах одного уровня, не требовали перестройки смежных уровней. В этой универсальной модели нет никакой привязки к конкретной аппаратуре используемых компьютеров, к аппаратуре соединяющих их сетей, к типу программного обеспечения, то есть модель *OSI* имеет в виду некую абстрактную систему.

Три верхних уровня – *прикладной, представления и сеансовый* – образуют *i-й процесс* и отображают в компьютерной сети пользователя и его задачу.

Четыре нижших уровня – *транспортный, сетевой, канальный и физический* – образуют *транспортную сеть* и обеспечивают собственно передачу данных.

Пользователям компьютерных сетей и прикладным программистам обеспечивается доступ только к самому верхнему – **прикладному** уровню, отвечающему за доступ приложений в сеть. Задачами этого уровня является управление сетью, перенос файлов, обмен почтовыми сообщениями и ряд других.

Уровень **представления** отвечает за возможность диалога между приложениями на разных машинах. Этот уровень обеспечивает преобразование данных (кодирование, компрессия и т.п.) прикладного уровня в поток информации для транспортного уровня. Протоколы уровня представления обычно являются составной частью функций трех верхних уровней модели.

На **сеансовом** уровне перечень услуг сводится к установлению сеансового соединения между двумя *приложениями*, распознаванию имен и обмену данными, выдаче сообщений об исключительных ситуациях, завершение сеансового соединения. Протоколы сеансового уровня также являются составной частью функций трех верхних уровней модели.

**Транспортный** уровень характеризуется рядом услуг, основными из которых являются: установление и разъединение транспортных соединений; обеспечение "прозрачной" передачи *пакетов* данных с любым содержанием, форматом и способом кодирования; обеспечение заданного качества сервиса (пропускная способность, транзитная задержка, коэффициент необнаруженных ошибок и вероятность отказов).

**Сетевой** уровень в числе основных услуг осуществляет сетевое соединение и идентификацию конечных точек сетевых соединений; маршрутизацию сообщений и управление информационными потоками, обеспечение правильной последовательности доставляемых блоков информации.

На **канальном** уровне предоставляются следующие услуги: формирование блоков (кадров) данных и их передача; идентификация оконечных пунктов передачи данных канальных соединений; синхронизация кадров и защита от ошибок.

**Физический** уровень обеспечивает такие виды услуг как: установление и идентификацию физических соединений, организацию передачи последовательностей битов по физической среде, оповещение об окончании связи.

Услуги различных уровней определяются с помощью протоколов эталонной модели взаимодействия открытых систем.

Следует заметить, что хотя модель OSI предложена достаточно давно, однако протоколы, основанные на ней, применяются редко. Это объясняется тем, что, во-первых, эталонная модель появилась хронологически позже других моделей; во-вторых, эталонная модель характеризуется не всегда оправданной сложностью своих протоколов; и, в-третьих, существованием на момент появления модели OSI, хотя и не соответствующим строго эталонной модели, уже хорошо зарекомендовавшим себя стеком протоколов TCP/IP.

## 9.4 Коммуникационные протоколы

*Протоколом* называют совокупность семантических и синтаксических правил, которые определяют поведение систем и устройств или их частей, выполняющих конкретные логически взаимосвязанные функции при передаче данных (правила обмена сигналами и сообщениями между устройствами или процессами). При описании протокола принято выделять его логическую и процедурную характеристики. *Логическая характеристика* протокола - структура (формат) и содержание (семантика) сообщений - задается перечислением типов и значений сообщений. *Процедурной характеристикой* называют правила выполнения действий, предписанных протоколом взаимодействия. Такая характеристика может быть представлена в различных формах - операторными схемами алгоритмов, моделями автоматов, сетями Петри и др.

Таким образом, логика организации компьютерной сети в наибольшей степени определяется протоколами, устанавливающими как тип и структуру сообщений, так и процедуры их обработки - реакцию на входящие сообщения и генерацию собственных сообщений. Существует большое разнообразие протоколов, различающихся областью применения, назначением, способом передачи управляющих сигналов и другими признаками.

По применению (**уровню**) различают:

- протоколы физического уровня – модемные протоколы;
- канального уровня – SLIP, PPP;
- сетевого уровня – шлюзовые протоколы – IP, RIP, IPX;
- транспортного уровня; МККТТ X.224, TCP.
- протоколы прикладного уровня - протокол передачи почтовых сообщений SMTP (*Simple Mail Transfer Protocol*); протокол для доступа к удаленному компьютеру TELNET; протокол передачи файлов FTP (*File Transfer Protocol*).

По **назначению**:

- протоколы установления соединения - V.8;
- коррекции ошибок - V.42;
- сжатия информации - V.42 bis, V.44, MNP5.6;



- эмуляции терминалов - Telnet;
- управления сетью - SNMP.

**По способу передачи управляющих сигналов:**

- байт – ориентированные - BSC;
- бит – ориентированные - HDLC.

**По области использования:**

- протоколы глобальных сетей - LAP, AAL.1-5;
- протоколы локальные сетей - NetBIOS, IPX, SPX.

Исторически сложилось так, что каждая организация, создававшая свою сеть, разрабатывала для нее стек протоколов. Слово "**стек**" отображает разделение сети на уровни, при котором протоколы верхних уровней располагаются над протоколами нижних. В настоящее время в компьютерных сетях используется большое количество стеков коммуникационных протоколов. Наиболее широко используются стеки: TCP/IP, IPX/SPX, NetBIOS/SMB, и OSI. Все эти стеки, кроме SNA, на канальном и физическом уровне используют одни и те же стандартизированные протоколы локальных сетей Ethernet, Token Ring, FDDI. Однако, на верхних уровнях различные компьютерные сети используют стеки своих протоколов. Следует отметить, что эти протоколы часто не соответствуют уровням, рекомендуемой моделью OSI. Это поясняется тем, что модель OSI появилась позже, как результат обобщения используемых стеков.

Основным требованием к сетевому администратору являются доскональное знание разнообразных протоколов. Он должен уметь анализировать характерные поля передаваемых пакетов, обнаруживать причины отказа сети или резкое снижение ее производительности, производить оптимизацию сети.

Когда протокол настроен и функционирует оптимально, а взаимодействие его с другими протоколами осуществляется бесконфликтно, то вся сеть обеспечивает бесперебойную и своевременную доставку сообщений.

Для контроля функционирования сети разработаны специальные анализаторы протоколов, с помощью которых можно контролировать установление сетевых соединений, последовательность открытия сеанса связи, механизмы рассылки сообщений, межсетевую адресацию и маршрутизацию в сети.

На настоящее время наиболее распространенным стеком транспортных протоколов компьютерных сетей. группа протоколов является TCP/IP. На этих протоколах построена всемирная сеть Internet. Они были разработаны в середине 70-х годов XX-го столетия для связи экспериментальной сети Министерства обороны США ARPAnet с другими сетями. Протоколы позволяют осуществлять обмен информацией между разнородными сетями.

Основными протоколами стека являются протоколы сетевого **IP** (*Internet Protocol*) и транспортного уровней **TCP** (*Transmission Control Protocol*). Эти же протоколы и дали название всему стеку. Протокол IP обеспечивает не гарантированную доставку пакетов между отдельными сетями составной сети, а TCP гарантирует безошибочную передачу пакетов между узлами сети.

Стек *TCP/IP* содержит протоколы четырех уровней: прикладной, транспортный, сетевой и канальный. Каждый уровень выполняет собственную функциональную нагрузку

ку по решению основной задачи – обеспечении высокопроизводительной и надежной работы составной сети, части которой могут использовать различные сетевые технологии.

Стек протоколов TCP/IP отличается от стека модели OSI. Базируясь на классификации модели OSI (*Open System Integration*) сопоставим всю архитектуру протоколов семейства TCP/IP с эталонной моделью. На рисунке 9.6 изображены основные программные модули, реализующие протокольные функции стека TCP/IP и их соответствие уровням модели OSI.

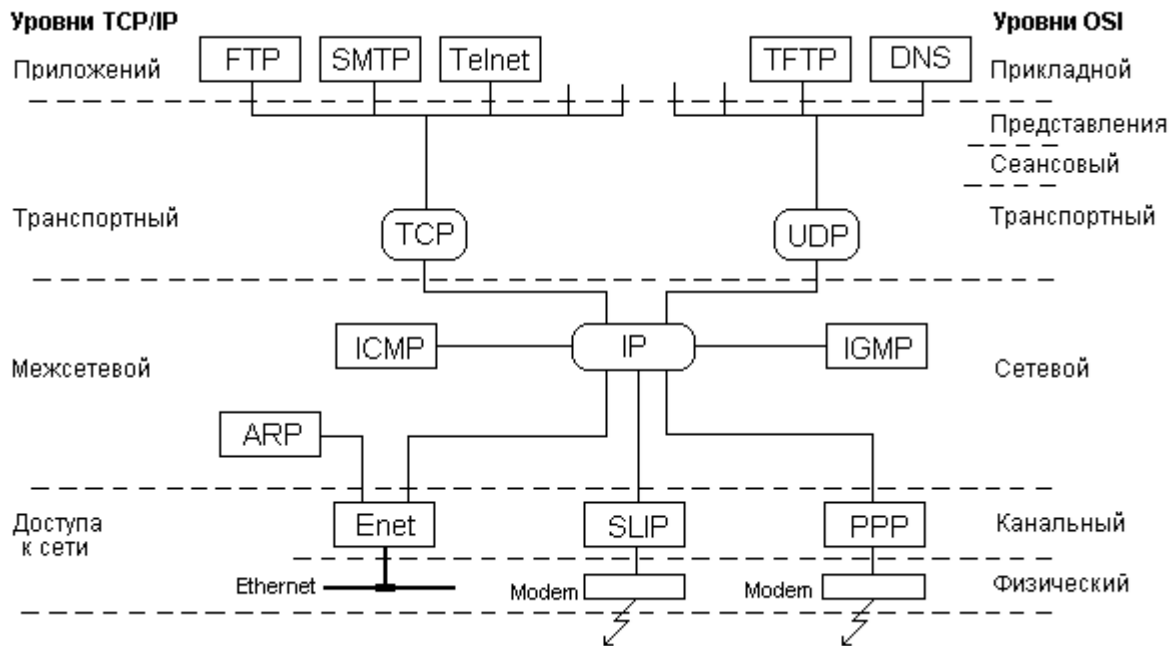


Рисунок 9.6 – Схема взаимодействия модулей, реализующих протокольные функции стека TCP/IP

Прямоугольниками на схеме обозначены модули, обрабатывающие пакеты, а линиями — пути передачи данных. **Модуль** представляет собой программу, взаимодействующую с драйвером сетевого адаптера, с сетевыми прикладными программами или с другими модулями. Схема приведена для случая подключения узла сети через локальную сеть *Ethernet*, поэтому названия блоков данных отражают эту специфику.

Сетевой интерфейс сети *Ethernet* (сокращенно Enet) – это физическое устройство, с помощью которого компьютер подключается к сети. В данном примере это сетевая карта (сетевой адаптер) *Ethernet*. Сетевой интерфейс передает (или принимает) данные в виде группы битов, которая носит название "*Кадр*" или "*Блок*".

Модуль IP обменивается с сетевым интерфейсом отрезками сообщения, получивших название "*IP-пакет*". На транспортном уровне единицей обмена является блок символов, который в зависимости от модуля, обрабатывающего этот блок, называется *UDP-дейтаграмма* или *TCP-сегмент*.

Блок данных, которым обмениваются программы сетевых приложений с протоколами транспортного уровня, получил название "*Прикладное сообщение*".

На рисунке 9.6 сокращенно обозначены следующие протоколы. **ARP** (*Address Resolution Protocol*) — используется для определения соответствия IP-адресов и *Ethernet*-

адресов. **SLIP** (*Serial Line Internet Protocol*) - протокол передачи данных по телефонным линиям общего пользования. **PPP** (*Point to Point Protocol*) — протокол обмена данными по схеме "точка-точка". **FTP** (*File Transfer Protocol*) — протокол обмена файлами. **Telnet** — протокол эмуляции виртуального терминала. **TFTP** (*Trivial File Transfer Protocol*) — упрощенный протокол передачи файлов. **DNS** (*Domain Name System*) - Система доменных имен, обеспечивающая возможность определить по символическому Интернет-адресу его числовой эквивалент.

Когда приложение посылает данные с использованием TCP, они передаются вниз по стеку протоколов, проходя через каждый уровень, до тех пор, пока не будут отправлены в виде потока битов по сети. Каждый уровень добавляет свою управляющую информацию к данным путем пристыковки заголовков. Данные верхних уровней как бы обволакиваются заголовком нижних (а иногда и окончанием). Такой процесс называют **инкапсуляцией** (рисунок 9.7). Числа, стоящие под заголовками и окончанием (завершителем) Ethernet, показывают стандартные размеры заголовков в байтах.

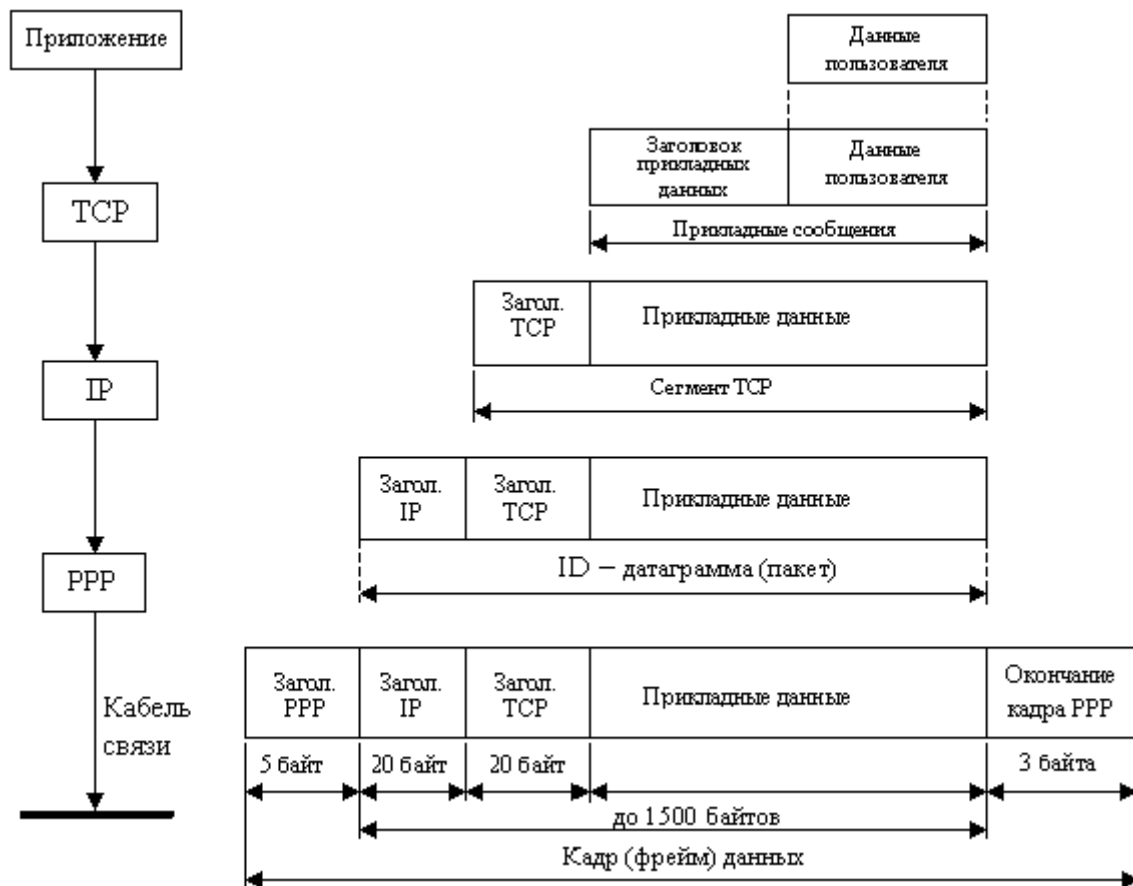


Рисунок 9.7 – Схема инкапсуляции данных

В случае передачи UDP-данных, процесс инкапсуляции выглядит почти аналогично. Различие заключается в том, что блок информации, который UDP передает в IP, называется UDP-дейтаграммой, а размер UDP-заголовка составляет всего 8 байт.

В технической литературе и стандартах по Интернет для обозначения минимальной единицы данных используется термин *октет*. Этот термин появился в литературе в

связи с тем, что реализация разработок по Интернет производилась на вычислительной технике, подобной DEC-10, где байт отнюдь не равнялся восьми битам. Так как в большинстве современных компьютеров байт равен восьми битам, то термины байт и октет в последующем используются как синонимы.

Протоколы TCP, UDP, ICMP и IGMP посылают данные на сетевой уровень IP. Протокол IP должен добавить определенный идентификатор к IP-заголовку, который он формирует, чтобы указать какому уровню принадлежат данные. IP делает это путем записи номера протокола в восьмибитном поле своего заголовка, которое называется полем протокола. Значение номера протокола равно 1 для ICMP, 2 для IGMP, 6 для TCP и 17 для UDP.

В связи с тем, что различные приложения могут использовать TCP или UDP в одно и то же время, протоколы транспортного уровня располагают в заголовке идентификатор приложения, которое их использует. В качестве такого идентификатора используется шестнадцатибитный *номер порта*. Протоколы TCP и UDP заносят номер портов источника и назначения в своих заголовках.

Сетевой интерфейс посылает и принимает кадры (*фреймы*), относящиеся к протоколам IP, ARP либо RARP. Для идентификации вышестоящего протокола в заголовке Ethernet выделено шестнадцатибитное поле типа фрейма. Когда фрейм *Ethernet* принимается приемником сетевой карты, он начинает свой путь вверх по стеку протоколов. При этом заголовки последовательно удаляются в процессе прохождения стека на соответствующих им уровнях. Каждый протокол просматривает определенные идентификаторы в заголовке, чтобы определить, какой следующий верхний уровень должен получить данные. Этот процесс называется демультимплексированием. Схема демультимплексирования изображена на рисунке 9.8.

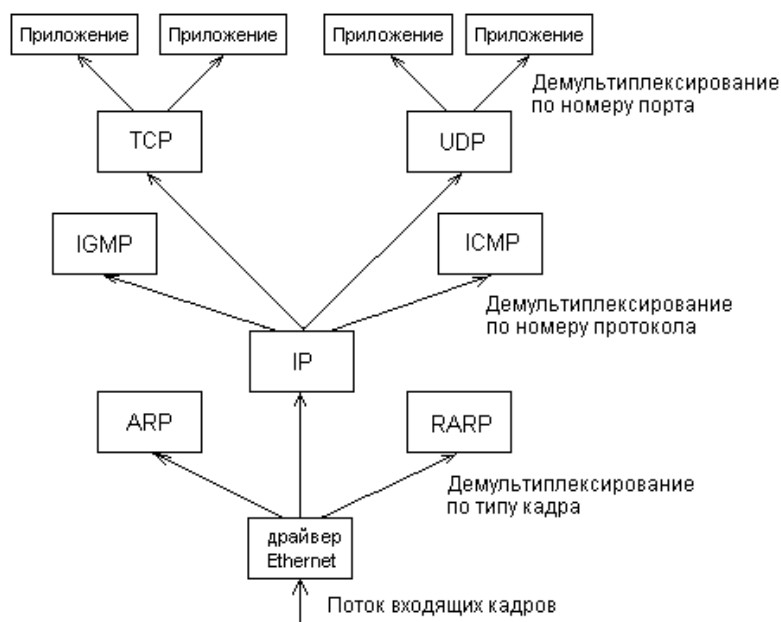


Рисунок 9.8 – Схема демультимплексирования пакетов

## 9.5 Способы коммутации в компьютерных сетях

В традиционных телефонных сетях, в которых передача ведется в аналоговой форме, коммутация состоит в физическом соединении в узлах коммутации необходимых участков линий и каналов связи и образовании сквозного тракта передачи сигналов от источника до получателя. В цифровых системах передачи, кроме прямого физического соединения, которое также может использоваться в узлах, возможно применение коммутации без организации физических соединений путем записи и считывания данных, относящихся к некоторому каналу, через определенную зону памяти.

Различают следующие способы коммутации в компьютерных сетях:

- *коммутация каналов* – создается сквозной тракт передачи путем последовательного соединения физических линий или каналов на время сеанса связи; после разъединения канал распадается на отдельные составные части, которые могут использоваться для образования других каналов;
- *коммутация сообщений* – передача данных осуществляется без установления сквозного соединения между взаимодействующими абонентами. Данные от абонента вначале передаются на ближайший узел коммутации, к которому он подсоединен и заносятся в запоминающее устройство узла. По мере освобождения каналов в направлении передачи и наличии свободной памяти в соседнем узле коммутации сообщение передается на следующий узел, занимая канал только на период времени передачи данных между смежными узлами;
- *коммутация пакетов* – осуществляется аналогично процедуре коммутации сообщений, но сообщение разделяется на более короткие фрагменты – пакеты. Пакет является самостоятельной адресуемой частью сообщения, передаваемой по сети независимо от других пакетов.

В цифровых системах с коммутацией каналов возможно комбинирование методов коммутации, использующих физические соединения (*пространственная коммутация*), с методами, базирующимися на применении памяти (*временная коммутация*). Задачей пространственной коммутации является перенос данных из одной электрической цепи (канала) в другую, а задачей временной – изменение временной позиции расположения битов или байтов данных в кадрах (пакетах).

**Пространственная коммутация.** В компьютерных сетях с коммутацией каналов (КК) при установлении соединения образуется сквозное физическое соединение между взаимодействующими абонентами сети. При этом сквозной канал составляется узлом коммутации каналов из отдельных участков сети и, как правило, устанавливается только на время сеанса связи. После завершения обмена данными канал разбирается и его составные части могут быть предоставлены другим пользователям.

*Коммутатор* размера  $M \times N$  представляет собой матрицу, в которой  $M$  канальных входов подключены к горизонтальным шинам, а  $N$  выходов – к вертикальным (рисунок 9.10,а). В узлах матрицы располагаются коммутирующие ключи (рисунок 9.10,б), которые под действием управляющих сигналов соединяют горизонтальную и вертикальную шины. Причем, в каждом столбце матрицы разрешается замыкать только один ключевой элемент. Точка соединения линий матрицы называется точкой коммутации. Если  $M < N$ , то коммутатор может обеспечить соединение каждого входа с не менее чем одним выходом; в противном случае коммутатор называется *блокирующим*, т.е. не обеспечивающим

соединения любого входа с одним из выходов. В реальных системах обычно применяются коммутаторы с равным числом входов и выходов, т.е. матрицы размером  $N \times N$ . На рисунке 9.9, в показано условное обозначение коммутатора размером  $M \times N$ .

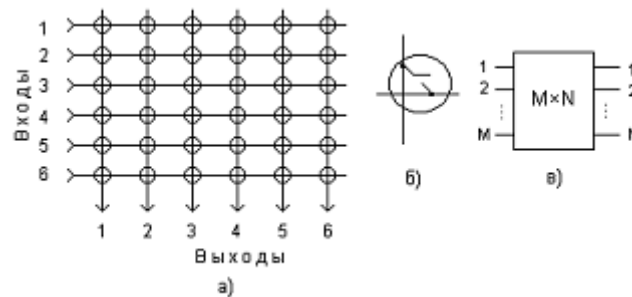


Рисунок 9.9 - Матрица пространственного коммутатора

Основной недостаток такого типа коммутаторов – квадратичный рост сложности схемы, т.е. число коммутирующих элементов для квадратной коммутационной матрицы равно  $N^2$ . Для устранения этого недостатка применяют многоступенчатые коммутаторы. Принцип построения многоступенчатого коммутатора заключается в том, что матричный коммутатор разбивают на части, которые соединяют промежуточным дополнительным коммутатором.

В системах передачи цифровых данных при пространственной коммутации нет необходимости физически соединять цепи входящих каналов с исходящими. Достаточно, чтобы биты из входящего канала попали в соединяемый исходящий канал. Пространственный коммутатор цифровых данных строится на основе буфера памяти, размещенного в оперативном запоминающем устройстве ОЗУ (рисунок 9.10).

Запись в его ячейки осуществляется устройством записи в процессе последовательного опроса входящих каналов. Коммутация осуществляется благодаря считыванию данных из нужных ячеек памяти ОЗУ на исходящие каналы. При этом происходит задержка выходных данных на время одного цикла "запись-чтение". На рисунке 9.10 показано состояние узла, при котором произведена следующая коммутация каналов:  $1 \rightarrow 2$ ;  $2 \rightarrow i$ ;  $m \rightarrow n$ ;  $n \rightarrow 1$ .

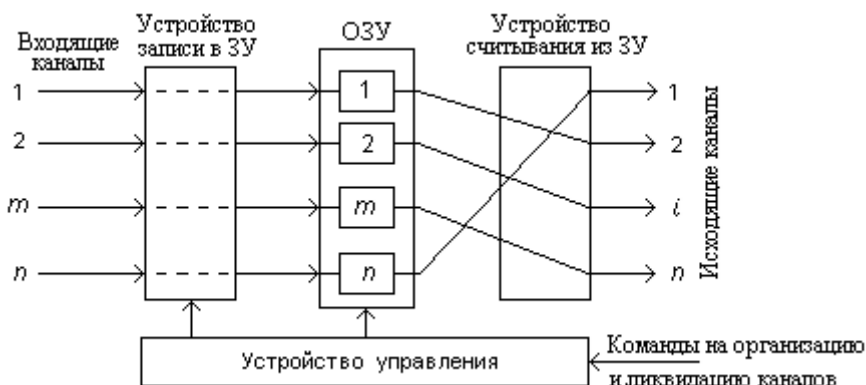


Рисунок 9.10 – Схема пространственной коммутации цифровых каналов

Такие коммутаторы являются полностью цифровыми и могут создаваться на основе больших интегральных схем (БИС). Поэтому их реализация намного проще и дешевле, чем пространственных коммутаторов для аналоговых сигналов.

В сетях с **коммутацией сообщений** передача данных осуществляется без установления сквозного соединения между взаимодействующими абонентами. Данные от абонента вначале передаются на ближайший узел коммутации, к которому он подсоединен и заносятся в запоминающее устройство узла. По мере освобождения каналов в направлении передачи, и наличии свободной памяти в соседнем узле коммутации, сообщение передается на следующий узел, занимая канал только на период времени передачи данных между смежными узлами. Такая процедура повторяется на каждом узле, через который проходит сообщение, до тех пор, пока сообщение не дойдет до адресата. Поэтому, даже при отсутствии свободных ресурсов, сети с коммутацией сообщений работают без отказов. Это является одним из основных преимуществ сетей с коммутацией сообщений. К преимуществу таких сетей относится также более высокая эффективность использования каналов за счет исключения повторных вызовов при отказах и более высокая надежность доставки сообщений за счет передачи данных по обходным направлениям сети при выходе из строя или перегрузки основного тракта.

Главный недостаток сетей с коммутацией сообщений – наличие задержек при доставке информации, причем задержка является случайной. Кроме того, при передаче больших сообщений повышается вероятность появления в них ошибок, что приводит к необходимости повторной передачи всего сообщения и, соответственно, к снижению эффективной скорости доставки информации.

Сети с коммутацией сообщений применяются в основном в интегральных сетях передачи данных общегосударственного масштаба. Для построения компьютерных сетей используется **принцип коммутации пакетов**, который является разновидностью коммутации сообщений. В компьютерных сетях данные содержатся чаще всего в виде файлов, которые имеют относительно большие размеры. Такие сети не могут нормально функционировать, если в них передается весь информационный блок (файл) целиком. Во-первых, информационный блок заполняет канал и связывает работу всей сети, т.е. препятствует взаимодействию остальных абонентов. Во-вторых, возникновение ошибок при передаче крупных блоков приводит к повторной передаче всего блока, что существенно снижает эффективную скорость обмена информацией.

**Пакет** представляет собой **короткое сообщение** длиной до нескольких тысяч байтов. Он является *самостоятельной адресуемой частью сообщения*, которая передается по сети независимо от других пакетов. Причем канал связи занимает только на время передачи пакета. При разбивке данных на пакеты сетевая операционная система добавляет к каждому пакету специальную управляющую информацию, которая обеспечивает:

- передачу исходных данных небольшими блоками;
- сборку данных в надлежащем порядке перед выдачей их потребителю;
- коррекцию ошибок в пакетах.

Обязательными компонентами для всех типов пакетов являются:

- адрес источника, идентифицирующий компьютер-отправитель;

- адрес места назначения, идентифицирующий компьютер-получатель;
- инструкции сетевым компонентам о маршруте прохождения данных;
- информация узлу коммутации или получателю о том, как объединять передаваемые пакеты, чтобы получить данные в исходном виде;
- передаваемые данные от источника;
- избыточную информацию для защиты от ошибок.

Сеть пакетной коммутации (рисунок 9.11) состоит из нескольких узлов коммутации пакетов (УКп), к которым подключены персональные компьютеры (ПК) абонентов сети или серверы. УКп строятся на основе специализированных ЭВМ, соединенных между собой высокоскоростными аналоговыми или цифровыми линиями и каналами связи.

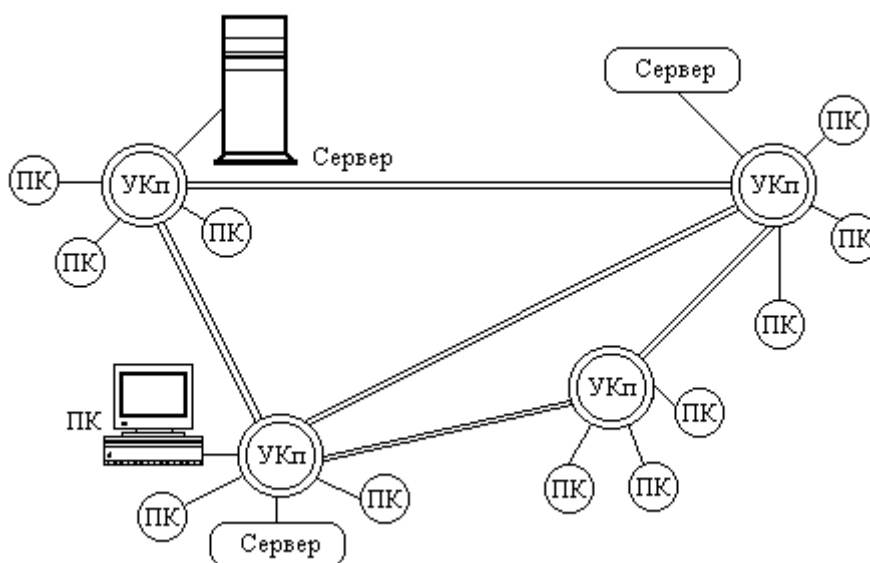


Рисунок 9.11 – Структура сети с коммутацией пакетов

Процесс формирования пакета начинается на прикладном уровне эталонной модели взаимодействия открытых сетей, там, где формируются данные. Сообщение, подлежащее передачи по сети, проходит сверху вниз все семь уровней. На каждом уровне компьютера-отправителя к блоку данных добавляется информация, предназначенная для соответствующего уровня компьютера-получателя.

В УКп реализуются три нижних уровня эталонной модели, на которых соответственно используются три типа блоков данных: *последовательность битов*, *кадр* и *пакет*. На верхних уровнях сообщение рассматривается как некоторый информационный блок, который на сетевом уровне упаковывается в пакет. Затем пакеты передаются на канальный уровень, где пакеты разбиваются на блоки и к ним добавляется служебная информация, необходимая для управления передачей на канальном уровне. Блок на канальном уровне получил название "**кадр**". На физическом уровне кадр представляется последовательностью битов, выдаваемых в форме физических сигналов в дискретный канал. При приеме информации происходит обратное преобразование последовательности битов в байты, из которых формируется кадр. На канальном уровне содержимое служебных полей кадра используется для выполнения процедур



канального уровня, а содержимое поля данных, являющееся сетевым пакетом, передается на сетевой уровень. Управляющее поле пакета формирует сетевой процесс в данном узле коммутации. Затем пакет вновь преобразуется УКп в кадр, содержащий обновленные адреса и соответствующие значения управляющих полей. Сформированный таким образом кадр данных передается на физический уровень и отправляется на следующий узел коммутации или на конечный узел, в который включен компьютер-получатель.

Существует два способа передачи пакетов по сети: **дейтаграммный** (датаграммный) и с использованием **виртуальных каналов**. *Дейтаграмма* представляет собой *однопакетное* сообщение, содержащее всю служебную информацию, позволяющую ей самостоятельно перемещаться по сети к получателю. Причем пакеты одного и того же сообщения могут передаваться по разным маршрутам, независимо друг от друга. Поэтому различные пакеты могут прибывать в пункт назначения в последовательности, отличной от той, в которой они входили в сеть. В некоторых сетях пакетной коммутации конечные узлы производят восстановление начального порядка поступления сообщения в сеть. В других задача сборки и сортировки пакетов возлагается на компьютер-получатель. В первом случае на узлах коммутации требуется наличие более сложных протоколов для восстановления потерянных или искаженных пакетов, обнаружения пакетов-дубликатов, при этом требуется большая емкость памяти. Если поток пакетов, поступающих на УКп, превышает допустимый, т.е. пакеты не могут быть переданы на конечный пункт в виду отсутствия свободных каналов и памяти на УКп, то часть пакетов теряется. Это явление называют *перегрузкой сети*. В связи с этим дейтаграммный способ передачи не гарантирует стопроцентную доставку пакетов.

*Виртуальное соединение* (виртуальный вызов) представляет собой логическое двухточечное соединение между абонентами отправителя и получателя. При виртуальном соединении перед передачей основной информации на узел пакетной коммутации посылается служебный пакет, запрашивающий ресурсы памяти для передачи заданного сообщения. В случае получения отказа из-за отсутствия на узле свободных ресурсов пакет с конечного пункта не посылается и тем самым не загружается сеть. Виртуальное соединение является аналогом соединения в сети с коммутацией каналов, за исключением того, что в нем образуется логическое, а не физическое соединение. Таким образом, при передаче сообщений в виртуальных соединениях все пакеты следуют по одному и тому же заранее установленному маршруту. Для формирования необходимого маршрута и его оптимизации используются различные методы маршрутизации сообщений.

Чтобы узел смог отличать дейтаграммный способ от виртуальных соединений в пакете располагается идентификатор виртуального канала. Управление потоком в сети ведется как узлами коммутации, так и конечным оборудованием данных. Первые проверяют загруженность сети, а вторые, собственно, управляют потоком данных. Для контроля над перегрузкой сети используются специальные биты уведомления о перегрузке.

## 9.6 Адресация и маршрутизация потоков в сетях

Для доставки сообщений в компьютерной сети необходимо указывать адрес получателя. Адреса в компьютерных сетях подразделяются на **локальные**, **глобальные** (межсетевые) и **символьные**.

Под *локальными* понимают такой тип адреса, который используется для доставки данных в пределах только одной сети. Так, например, если подсетью объединенной сети является локальная сеть, то локальный адрес носит название **MAC-адрес** (от слова *Media Access Control* - управление доступом к среде). **MAC**-адреса присваиваются производителями сетевого оборудования сетевым адаптерам и сетевым интерфейсам маршрутизаторов. В связи с этим локальные адреса иногда называют аппаратными или физическими.

*Глобальные адреса* предназначены для использования в объединенной сети. Адресное пространство глобальных сетей обычно подразделяется на отдельные области – **домены**. Такое решение упрощает адресацию компьютеров и позволяет использовать в различных доменах одни и те же значения адресов. Адреса действительны внутри только того адресного пространства (адресного домена), которому они принадлежат и являются однозначными.

В зависимости от количества составных частей адреса их подразделяют на **одно-** и **многоступенчатые**. *Локальные адреса* состоят из одной части, т.е. являются одноступенчатыми. Примером многоступенчатой адресации является **ISO**-адресация сетевого уровня. В такой системе адрес содержит следующие составные части:

- идентификатор первичного домена *IDP (Initial Domain Part)* - задает адресное пространство самой верхней ступени иерархии адресов;
- идентификатор авторизации и формата – *AFI (Authority and Format ID)* - указывает какая организация управляет адресами доменов (*ITU, ISO*);
- инициализатор домена *IDSP (Initial Domain Specific Part)* - задает адреса домена;
- указатель адреса поддомена *DSP (Domain Specific Part)*.

Межсетевые адреса широко используемой сети Интернет являются двухступенчатыми. Первая ступень содержит **имя сети** (подсети), а вторая – **имя компьютера** (хоста) в данной сети.

*Символьные адреса* представляют собой последовательность некоторых символов для обозначения месторасположения устройства или абонента в сети. Для обеспечения однозначности имен абонентов различных доменов в общем пространстве адресов, дополнительно к внутридоменному адресу абонента, добавляется обозначение домена, к которому относится данный абонент. Такие имена часто используются для символического обозначения адресов и облегчают запоминание их пользователями.

Сетевые адреса подразделяются также на **групповые** и **широковещательные**. В случае групповой адресации (*Multicast-Address*) можно опрашивать (адресовать) несколько конечных пунктов одновременно. Особым видом группового адреса является широковещательный адрес (*Broadcast-Address*). При указании такого адреса сообщение поступает всем компьютерам сети. На практике для задания широковещательного адреса часто используется последовательность, состоящая из всех единиц.

**Способы маршрутизации сообщений.** В процессе соединения между двумя абонентами необходимо указать маршрут в сети, то есть определить те узлы сети, через которые будет проходить соединение. Процесс выбора маршрута прохождения сообщения называется *маршрутизацией*. Цель маршрутизации - доставка пакетов по назначению с максимальной эффективностью. Чаще всего эффективность выражена взвешенной суммой времен доставки сообщений при ограничении на вероятность доставки их получателю. Маршрутизация сводится к определению направлений движения пакетов в узлах (маршрутизаторах). Выбор одного из возможных в узле направлений зависит от текущей топологии сети, которая может меняться хотя бы из-за временного выхода некоторых узлов из строя, длин очередей в узлах коммутации, интенсивности входных потоков и т.п.

Алгоритмы маршрутизации включают следующие типовые процедуры:

- измерение и оценивание параметров сети;
- принятие решения о рассылке служебной информации;
- расчет таблиц маршрутизации (ТМ);
- реализация принятых маршрутных решений.

Соединения должны организовываться таким образом, чтобы, по возможности, они были наиболее короткими, но вместе с тем соблюдалась равномерность загрузки каналов и узлов. То есть, при организации канала следует обходить те участки сети, которые в данный момент перегружены. Для идеальной маршрутизации необходимо учитывать всю информацию о состоянии сети, а также прогнозировать будущую загрузку на некоторый интервал времени. Реализация этого потребовала бы сбора в едином центре всей информации о сети (загрузка трактов, отказы узлов и каналов и так далее).

Сбор информации в единый центр приводит к дополнительной загрузке сети передачей служебной информацией. Объем этих данных увеличивается с ростом размерности сети, вследствие чего в больших сетях возникают задержки. Все это приводит к тому, что задача выбора маршрута в большой сети становится очень сложной и для ее решения применяются специальные методы маршрутизации.

Классификацию видов маршрутизации проводят по различным признакам, в частности по степени централизации:

- **распределенная**, каждый узел сети самостоятельно принимает решение о выборе маршрута;
- **централизованная**, маршрут определяется центром управления сети и сообщается всем узлам, которые находятся на данном маршруте;
- **смешанная**, маршрут определяется в узлах коммутации на основе рекомендаций центра управления.

По используемой информации для выбора пути различают маршрутизацию:

- без учета информации о сети, являющуюся простейшим способом и осуществляемую по всем направлениям, либо по случайно выбранному пути;
- с учетом локальной информации, при которой применяется только та информация, которая имеется на узле;
- с учетом глобальной информации, в случае которой принимается во внимание состояния соседних узлов сети.

В компьютерных сетях применяются различные способы маршрутизации: волновой, с фиксированными и альтернативными путями, альтернативный.

**Волновая (лавинная) маршрутизация** (*flooding*). При этом способе осуществляется децентрализованная маршрутизация без учета какой-либо информации о сети. Суть его состоит в следующем. Поступивший в узел пакет передается по всем выходным направлениям (*широковещательная передача*), за исключением узла, с которого поступил пакет. Если в узел поступает пакет, который уже проходил по нему, то этот пакет стирается. Чтобы размножающиеся пакеты не перегружали сеть, удаляются некоторые пакеты, тайм-аут которых истек, либо прошедших через количество узлов, превышающее некоторое заданное число. Существует усовершенствованная версия широковещательной маршрутизации, называемая селективной широковещательной рассылкой. По этому способу рассылка производится не по всем возможным направлениям, а только по тем, которые предположительно ведут в правильную сторону.

Основным достоинством способа является высокая надежность (использование в специальных сетях). Недостаток – сильная загрузка сети, усложнение узлов. Разработаны модификации способа, при которых ограничивается зона распространения "волны" определенной областью сети. Способ достаточно широко используется в локальных сетях при передаче широковещательных сообщений.

**Маршрутизация с фиксированными путями** подразделяется на одномаршрутную и на маршрутизацию с альтернативными путями. Она относится к *распределенному* способу маршрутизации, при котором используется только информация о *топологии* сети. Текущее состояние сети не учитывается. Соединение между узлами при одномаршрутном способе осуществляется всегда по одному и тому же пути. Любые изменения в маршрутные таблицы вносит только администратор сети. Основное достоинство способа – его простота, однако, при отказах отдельных направлений часть соединений при этом способе вообще не возможна. К недостатку такой маршрутизации следует отнести также игнорирование фактической загрузки трактов. Поэтому способ с фиксированными путями используется преимущественно на сетях со стабильной нагрузкой.

**Маршрутизация с альтернативными путями** к *распределенному* способу маршрутизации *с учетом локальной* информации о топологии сети. Для каждого адресата существует несколько путей. При работе сети для всех возможных маршрутов *вычисляется* определенная доля *трафика* (информационного потока), которую следует по нему передавать. При этом способе учитывается только топология сети, но не используются сведения о состоянии сети или данного узла. Администратор сам решает, по какому пути (путям) следует передавать пакеты.

**Адаптивная маршрутизация** учитывает динамическое состояние узла или сети, т.е. маршрут адаптируется к состоянию сети. Способы разделяют на *локальные* (учет только состояния собственного узла) и *глобальные*, в которых учитывается состояние всей сети или большей ее части. Протоколы, построенные на основе адаптивной маршрутизации, позволяют всем узлам собирать информацию о топологии сети и оперативно обрабатывать все изменения ее конфигурации.

Для определения необходимого маршрута, на узлах размещаются *адресные таблицы*, содержащие полный набор идентификаторов (*адресов*), опознаваемых на данном узле коммутации. В адресной части каждого пакета имеется идентификатор получателя или *набор адресов узлов*, через которые должно проходить сообщение. Специальные программы маршрутизации анализируют адресные части пакетов и на основании таблиц,

и дополнительной информации о состоянии сети, преобразуют их в направления передачи. При этом на многих узлах осуществляется определение *оптимального* маршрута. Критерием оптимизации чаще всего выступает время доставки пакетов в сети.

В качестве математического аппарата оптимизации используется теория графов, потоков и сетей. Оптимизация маршрута сводится к выбору кратчайшего пути в графе с минимальной очередью пакетов.

В отличие от классических телефонных сетей и интегральных цифровых сетей передачи данных, компьютерные сети имеют специфические особенности транспортировки сообщений, в частности:

- многие соединения проходят через очень большое число узлов коммутации;
- линии и узлы обладают недостаточно высокой надежностью;
- характер передаваемых сообщений в течение нескольких минут может существенно измениться;
- малое количество альтернативных путей передачи.

При рассмотрении наиболее широко используемых алгоритмов маршрутизации будем исходить из того, что каждому из узлов сети известны адреса соседних узлов, а для всех линий связи, соединяющих соседние узлы, определена их метрика. В качестве **метрики** связей часто используется "**стоимость**" или "**расстояние**". Обобщенное понятие стоимости учитывает как фактическую стоимость использования линии, так и ряд других параметров (расстояние, пропускную способность, задержку передачи и т.д.).

Рассматриваемые алгоритмы относятся к распределенным, в которых узлам удается так выстроить глобальную маршрутную информацию, что определяется маршрут с минимальной стоимостью, хотя каждый узел обменивается сообщениями только со своими соседями. Для этого в общем требуется большое число шагов (*хопов*), пока сеть не установится в стабильное состояние.

При выполнении алгоритма маршрутизации узел должен получать информацию от соседних узлов, выполняющих такой же алгоритм маршрутизации, о сетях, которые могут быть достижимы при передаче данных через каждый соседний узел. Накапливая полученную информацию, каждый узел может определить направление – маршрут передачи данных для каждой из достижимых сетей. В случае, если таких маршрутов оказалось несколько, алгоритм маршрутизации может предусматривать использование специального критерия для выбора лучшего из них.

В зависимости от способа, используемого для обеспечения обмена информацией о маршрутах в сети между узлами при выполнении алгоритма маршрутизации, различают два типа протоколов маршрутизации:

- Протоколы **дистанционно-векторные** (*distant vector*);
- Протоколы **оценки состояния линий** (*link state*).

Дистанционно-векторные протоколы передают информацию о маршрутах периодически через установленные интервалы времени.

Протоколы оценки состояния линий предусматривают передачу информации о маршрутах в момент первоначального включения или при возникновении изменений в существующей структуре информационных связей.

**Алгоритм Беллмана-Форда** относится к дистанционно-векторным алгоритмам DVA (*Distance Vector Algorithms*). Исходным положением в этом алгоритме является то,

что каждому узлу известно расположение и возможности узлов сети, но не известны кратчайшие пути к ним. Под кратчайшим путем подразумевается путь с минимальной стоимостью. На каждом узле имеется вектор расстояний, представляющий собой список с записями вида: "*Получатель; Стоимость*". *Стоимость* обозначает при этом текущее значение суммы стоимостей доставки сообщения по кратчайшему пути к соответствующему получателю. В качестве начального значения каждый узел устанавливает такие стоимости доставки сообщений к несмежным узлам, которые заведомо выше самых высоких ожидаемых затрат (устанавливается бесконечно большое значение).

Через установленное время узлы сети периодически рассылают служебные пакеты *update*, содержащие текущие значения векторов стоимостей, всем своим непосредственным соседям. На основании этой информации каждый узел сети определяет для любого возможного получателя пути с минимальными затратами. Это производится суммированием стоимостей доставки сообщений соседям с соответствующими стоимостями доставки от соседа к получателю, которые сообщил его соседний узел.

В процессе маршрутизации возможно возникновение ситуации, когда периодическое обновление может быть потеряно в сети из-за возникновения краткосрочной перегрузки или временной неработоспособности канала передачи данных. Для того чтобы в этой ситуации маршруты не были ошибочно удалены из таблицы, каждому маршруту ставится в соответствие специальный счетчик времени, который называется *timeout – timer*. В тот момент времени, когда данный путь включается в таблицу маршрутизации, или когда для него приходит очередное обновление значение счетчика *timeout – timer* устанавливается равным  $T_{to\ max}$  и этот счетчик начинает обратный отсчет времени. В том случае, если счетчик *timeout – timer* какого-либо маршрута достигнет значения 0, этот путь должен быть исключен из числа активных маршрутов. В реальных сетях  $T_{to\ max}$  инициализируют на 180 с.

**Маршрутизация с учетом состояния линий.** Недостатки, присущие дистанционно-векторной маршрутизации, вызваны тем, что узлы имеют слишком мало информации о топологии всей сети. При учете состояния линий связи (*Link State Routing- LSR*) узлы сети располагают информацией о топологии всей сети и о стоимости связей между ними. Все узлы сети используют один и тот же алгоритм для определения первого кратчайшего пути SPF (*Shortest Path First*).

В начале функционирования сети каждый узел формирует группу пакетов состояния линий *LSA (Link State Advertisements)*. *LSA*–пакет содержит идентификаторы собственного и соседнего узлов, а также стоимость связей между ними. На следующем шаге пакеты состояния линий рассылаются широковещательно *всем* другим узлам сети. Узлы, получившие *LSA*–пакеты от всех маршрутизаторов сети, параллельно друг с другом создают топологическую базу данных, содержащую все *LSA*–сообщения. На основе полученной информации узлы рассчитывают пути с минимальными стоимостями. При этом маршрутизатор рассчитывает топологию кратчайших путей в виде SPF-дерева, помещая себя в корень. Всякий раз, когда *LSA*–пакет вызывает изменение в базе данных состояния каналов, алгоритм учета состояний линий пересчитывает пути и обновляет таблицу маршрутизации.

Алгоритм SPF гарантирует правильное функционирование сети при нарушениях связи или выходе из строя отдельных маршрутизаторов и исключает возможность двукратной передачи пакета по одному и тому же пути. К алгоритмам, использующим зна-

ния о топологии всей сети и учитывающим стоимостей связей между всеми ее узлами, относится алгоритм **Дейкстры** (*Dijkstra's algorithm*). С помощью этого алгоритма находятся кратчайшие маршруты от данного узла-источника до всех остальных узлов сети.

На основании алгоритма Дейкстры определяются оптимальные пути от заданного узла-источника до всех остальных узлов сети, в процессе перебора маршрутов в порядке увеличения их длин. Построение путей происходит поэтапно. На  $l$ -м шаге находятся  $l$  путей с минимальной стоимостью к  $l$  узлам.

В настоящее время в сети Internet используемые протоколы маршрутизации – это RIP (*Routing Information Protocol*) и OSPF (*Open Shortest Path First*). Протокол RIP основан на *алгоритме Беллмана-Форда* и используется преимущественно на нижних уровнях иерархии. Хотя алгоритм Беллмана-Форда сходится медленно, однако для сетей сравнительно небольших масштабов он вполне приемлем. В больших сетях лучше себя зарекомендовал алгоритм OSPF, основанный на использовании в каждом маршрутизаторе информации о состоянии всей сети. OSPF – алгоритм динамической маршрутизации, в котором информация о любом изменении в сети рассылается лавинообразно. В основе OSPF лежит алгоритм Дейкстры – поиска кратчайшего пути в графах.

## 9.6 Адресация в сети Интернет

Каждый компьютер в сети TCP/IP имеет адреса трех уровней:

- **Локальный адрес узла**, определяется технологией, используемой для построения отдельной сети, в которую входит данный узел. Для узлов, входящих в локальные сети – это MAC-адрес сетевого адаптера или порта маршрутизатора, например, 11-A0-17-3D-BC-01. Эти адреса назначаются производителями оборудования и являются уникальными адресами, так как они присваиваются централизованно. Для всех существующих технологий локальных сетей MAC-адрес имеет формат, состоящий из **6 байтов**: старшие 3 байта – идентификатор фирмы производителя, а младшие 3 байта назначаются уникальным образом самим производителем. Для узлов, входящих в глобальные сети, таких как X.25 или *Frame Relay*, локальный адрес назначается администратором глобальной сети.

- **IP-адрес** используется на сетевом уровне. Он назначается администратором сети во время конфигурирования компьютеров и маршрутизаторов. IP-адрес содержит две части: *номер сети* и *номер узла (хоста)*. **Номер сети** часто называют **префиксом** сетевого адреса, а номер хоста – **суффиксом**. Номер сети может быть выбран администратором произвольно, либо назначен по рекомендации специального подразделения *Internet* (*Network Information Center*, NIC), если сеть должна работать как составная часть Internet. Обычно провайдеры услуг *Internet* получают диапазоны адресов у подразделений NIC, а затем распределяют их между своими абонентами.

**Номер узла (сетевого компьютера)** в протоколе IP назначается независимо от его локального адреса. Деление IP-адреса на поле номера сети и номера узла – гибкое, и граница между этими полями может устанавливаться произвольно. Узел может входить в несколько IP-сетей. В этом случае узел должен иметь несколько IP-адресов, по числу сетевых связей. Таким образом, IP-адрес характеризует не отдельный компьютер или маршрутизатор, а одно сетевое соединение.

- **Символьный адрес**, например, SERV1.IBM.COM. Этот адрес назначается администратором и состоит из нескольких частей, например, имени компьютера, имени орга-

низации, имени домена. Такой адрес, называемый также DNS-именем, используется на прикладном уровне, например, в протоколах FTP или *Telnet*.

**Физические объекты**, такие как сетевые компьютеры (хосты), маршрутизаторы, подсети, в IP-сети идентифицируются при помощи имен, называемых **IP-адресами**. Если объект соединен с несколькими подсетями, то в каждой из них он имеет свой адрес, входящий в подмножество адресов соответствующей подсети. Поэтому можно сказать, что объектом является скорее сетевое соединение, чем некоторое физическое устройство.

**IP-адреса** представляют собой 32-битовые идентификаторы, структура которых оптимизирована для решения основной задачи протокола IP-маршрутизации. Каждому сетевому интерфейсу присваивается уникальный IP-адрес. Основное преимущество от деления IP-адреса на две части проявляется при рассмотрении процесса маршрутизации, и, в частности, размеров таблиц маршрутизации. При таком подходе у маршрутизатора появляется возможность хранить в таблице маршрутизации только один элемент записи для всех компьютеров одной сети, а не один элемент для каждого сетевого компьютера. Кроме того, при выполнении маршрутизации нужно проанализировать только сетевую часть IP-адреса.

Для удобства представления IP-адресов для пользователя применяется их цифровое написание, при котором адрес записывается, как десятичное представление 4-х байт (октетов), разделенных точками, например:

**192.171.153.60**

В двоичной форме представления этот адрес будет выглядеть следующим образом:

11000000 10101011 10011001 00111100.

Каждый адрес можно представить в виде пары идентификаторов: идентификатор **сети** и идентификатор **хоста** (компьютера): **NetID**, **HostID**. Все IP-адреса разделены на 5 классов, однако на практике применяется, в основном, три из них.

<b>Класс А</b>	- определен для сетей с числом хостов от 65535 до 16777215. В адресах этого класса 7 бит отведены под поле <i>идентификатора сети</i> <b>NetID</b> , а 24 – поле <i>идентификатора хоста</i> <b>HostID</b> . Первый бит является <i>идентификатором класса адреса</i> .
<b>Класс В</b>	- используется для среднемасштабных сетей, в которых содержится от 256 до 65536 хостов. Под поля NetID и HostID отводится соответственно 14 и 16 битов. Для идентификации класса адреса выделено два первых бита.
<b>Класс С</b>	- применяется для сетей с числом компьютеров менее 256. Под HostID отведено 8 бит. Идентификатором класса адреса С являются первые три бита.
<b>Класс D</b>	- предназначен для отправки сообщений определенному множеству (группе) адресатов. Идентификатором класса адреса D служат первые четыре бита.
<b>Класс E</b>	- зарезервирован для будущих использований.



Все функции протокола IP исполняют хосты и маршрутизаторы. Следует иметь в виду и четко представлять, что IP-адрес идентифицирует сетевое соединение, а не хост. Поэтому, если хост переносится из одной подсети в другую, то ему следует обязательно изменить адрес. Компьютеры, подсоединенные к нескольким сетям, имеют несколько IP-адресов – по одному для каждого сетевого интерфейса.

Помимо адресов, предназначенных для *индивидуального хоста (unicast)*, существуют *широковещательные (broadcast)* и *групповые (multicast)* адреса и др. **Широковещательные адреса** позволяют обращаться ко всем хостам сети. В них поля идентификации состоят только из единиц **FFFFFFFFh**. Механизм IP предоставляет возможность широковещательной передачи, но не гарантирует ее, если каждая физическая сеть не обеспечивает режим.

**Групповые** адреса применяются для передачи пакетов нескольким компьютерам. Они используются при проведении телеконференций, передачи почты и т. д.

**Тестовый** адрес – первый байт имеет значение 127 (**11111110 | xxxx...x**), а оставшееся поле не специфицировано (обычно заполняется единицами). Он используется для отладки и тестирования, не является адресом никакой сети и не обрабатывается маршрутизатором.

Адреса типа **loop back** представляет собой виртуальный адрес, который присваивается любому интерфейсу, сконфигурированному для обработки пакетов протокола IP. Этот адрес имеет только локальное значение в пределах данного компьютера и может быть использован для проверки функционирования программных компонентов, которые применяются для реализации в данном устройстве стека протоколов TCP/IP. Для адресов указанного типа используется одна из сеток класса A, в качестве номера хоста обычно используется значение "1", например 127.0.0.1.

В объединенной сети введено понятие "**частная сеть**". К этому виду относят сети, в которых для обеспечения информационного взаимодействия не требуется обращения к глобальным ресурсам *Internet*. К категории "частная сеть" относят также сети, узлы которых для обращения к информационным ресурсам глобальной сети применяют специальные шлюзы. В соответствии международным стандартом для построения сетей, попадающих под определение "частная сеть" могут быть использованы следующие диапазоны адресов *Internet*:

Класс	Начальный адрес	Конечный адрес	Число сетей
A	10.0.0.1	10.255.255.255	1
B	172.16.0.0.	172.31.255.255	16
C	192.168.0.0.	192.168.255.255	255

Для того чтобы обеспечить информационное взаимодействие между компонентами сети *Internet*, необходимо установить соответствие между сетевыми адресами IP и аппаратными MAC-адресами. Эта функция в стеке протоколов TCP/IP возложена на протокол, который называется ARP (*Address Resolution Protocol*).

Уникальный IP-адрес назначается каждому сетевому интерфейсу специальной организацией *Internet Network Information Center (InterNIC)*, которая отвечает за выделение адресов сетям, объединенным в Internet. Назначение идентификаторов хостов не входит в

компетенцию InterNIC и находится в ведении системного администратора компьютерной сети.

В связи с бурным ростом Internet, 32-битовая адресация нынешней версии **IPv4** уже не удовлетворяет потребностям Мировой сети. Новая версия **IPv6** имеет 128-битовый формат IP-адреса и поддерживает автоматическое назначение адресов.

## **10. Локальные компьютерные сети**

### **10.1. Топология локальных компьютерных сетей**

Локальные компьютерные сети (ЛКС) представляет собой такую разновидность сетей, в которой все ее компоненты, включая ЭВМ различных классов, расположены на ограниченной территории одного предприятия или учреждения и соединены через единую физическую среду. Расстояния между компьютерами локальной сети составляют от сотен метров до десятков (10-20) км. В локальных сетях сетевые компьютеры называют рабочими станциями. Ограниченность территории создает предпосылки для использования специфических способов передачи данных, отличных от традиционных, применяемых в глобальных сетях. Благодаря этому в ЛКС удастся реализовать значительно более высокую скорость передачи (до тысяч Мбит/с) и на несколько порядков более низкую вероятность ошибок при существенно меньших затратах. Расположение локальной сети на ограниченной территории влияет также на способы административного сетевого управления, а технические характеристики ЛКС приводят к необходимости введения новых протоколов.

В качестве физической среды ЛКС наибольшее распространение получили электрические кабели типа "витая пара", коаксиальные и волоконно-оптические кабели. В последнее время все большую популярность получают беспроводные линии связи. В дальнейшем, при описании ЛКС понятия "среда", "линия" и "канал" используются как синонимы.

Основные отличия архитектуры ЛКС от архитектуры глобальных сетей связаны с нижними тремя уровнями. Использование единой физической среды позволяет существенно упростить функции уровня маршрутизации. Нижние два уровня ЛКС имеют свою специфику, связанную с топологией сети и методами доступа к физической среде.

Различают линейную (а), звездообразную (б), кольцевую (в), шинную (г) и древовидную (д) топологию ЛКС (Рисунок 10.1). Все структуры сети, кроме шинной, представляют собой двухточечные звенья. В линейной структуре сети сообщения должны пройти через несколько узлов, прежде чем они достигнут цели. Поэтому в случае повреждения одного из звеньев сообщение не может быть доставлено адресату, что является существенным недостатком такой сети.

Топология "звезда" характеризуется наличием центрального узла коммутации (УК), к которому подключаются все остальные рабочие станции (РС). Через этот узел циркулирует весь сетевой трафик, поэтому нагрузка на узел очень высокая. Сетевое оборудование центрального узла, оказывается, намного сложнее, чем оборудование абонентов сети. К достоинствам "звезды" относится достаточно высокая надежность сети в целом. Так обрыв одного сетевого кабеля или короткое замыкание в нем нарушает работу

только одного компьютера, а все остальные могут продолжать работу. Положительным свойством является также наличие на каждой линии связи только одного передатчика и приемника, что заметно упрощает сетевое оборудование по сравнению с "шиной". Недостаток звездообразной структуры состоит в низкой скорости обработки информации и большой суммарной протяженности линий связи. При этом, при выходе центрального узла из строя отказывает вся сеть.

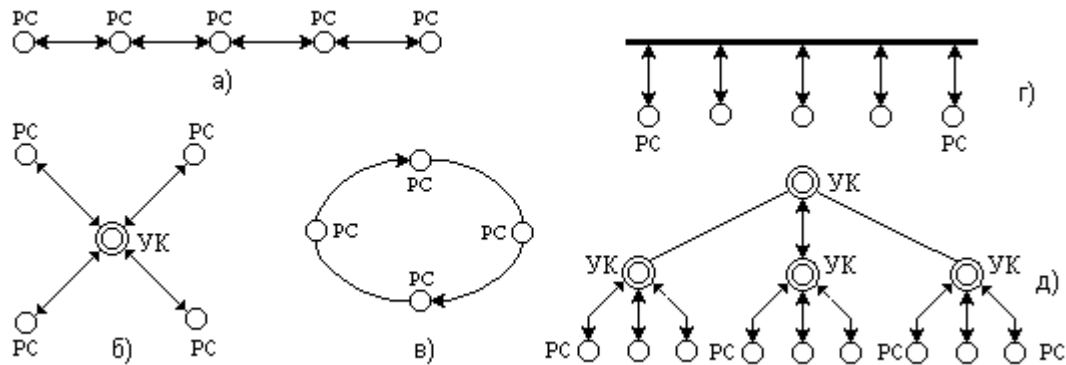


Рисунок 10.1 – Топология локальных компьютерных сетей

Преимуществом "кольца" является возможность использования однонаправленной линии связи. На каждом участке к линии связи подключены только один передатчик и один приемник. По этой причине нет необходимости использовать согласующие сопротивления (терминаторы). Недостатком кольцевой топологии является загрузка узлов всей той информацией, которая передается по сети.

Шинная топология является одной из простейших по способу подключения рабочих станций. В такой структуре отсутствует центральный узел, через который передается вся информация. Это увеличивает надежность сети. Однако она предполагает идентичность сетевого оборудования компьютеров, а также равноправие всех абонентов. При таком соединении компьютеры могут передавать данные только по очереди, так как линия связи одна на всех (моноканал). На концах линии связи должны устанавливаться согласующие сопротивления (терминаторы) для исключения появления отраженных волн, вызывающих искажение сигналов. Обрыв или замыкание в линии выводит из строя всю сеть. К существенным недостаткам шинной структуры также относится возможность возникновения *сетевых коллизий*. Коллизия возникает всякий раз, когда одновременно ведут передачу две или несколько рабочих станций сети, что приводит к разрушению информации. Разработаны специальные протоколы связи, позволяющие исключить потери информации при возникновении коллизий, либо исключаяющие их возникновение.

Древовидная топология представляет собой иерархическую звезду. Она имеет достоинства, присущие звездной топологии. Используется для увеличения количества рабочих станций сети при ограниченном числе портов узловой станции.

## 10.2. Методы доступа к среде

Характерной чертой многих локальных сетей является коллективное использование ресурсов среды передачи данных — линии связи, которая является *моноканалом*. Че-

рез такую среду в заданный промежуток времени может передавать информацию только один сетевой компьютер. Поэтому возникает проблема разделения ресурсов среды передачи данных, которая решается различными методами. Наиболее широко используется метод множественного доступа с контролем передачи и обнаружения конфликтов (CSMA/CD), а также метод управления (доступа) с передачей маркера.

**Метод доступа CSMA/CD** (*Control Send Multi Access/Collision Detecting*). При использовании этого метода **станции могут передавать сообщения** только если канал связи свободен. В случае одновременной передачи информации несколькими станциями возникает конфликтная ситуация (*коллизия*), в результате чего происходит разрушение передаваемых данных. Поэтому станции должны прекратить передачу, выждать некоторое время и продолжить ее по одной только при наличии свободного канала. Для определения занятости канала используется контроль уровня несущей в среде. Чтобы избежать повторения коллизий, время ожидания включения станций выбирается различным (случайным). Если одна из станций начала передачу, то канал, оказывается, занятым и все другие станции должны ждать его освобождения.

Большую часть времени схема канального уровня (сетевая карта) находится в режиме прослушивания канала связи. В этом состоянии анализируются все кадры, передаваемые в канале. Если заголовок кадра содержит адрес назначения, совпадающий с адресом узла, то схема канального уровня переходит в состояние приема, во время которого осуществляется прием кадра.

После завершения приема кадра выдается сообщение на сетевой уровень сети (IP модуль), а приемник переключается в режим прослушивания. Возможно, что коллизия произойдет во время приема кадра. В этом случае прием кадра прерывается и приемник канального уровня переключается в состояние прослушивания.

Передача кадра в среду может быть произведена только по запросу сетевого уровня. Если станция во время этого запроса не находится в состоянии приема, то схема канального уровня переходит в состояние ожидания. В этом состоянии узел ждет освобождения канала и начинает передачу пакета. В случае, если передача завершается успешно (без коллизий), состояние аппаратуры канального уровня вновь изменяется на состояние прослушивания. Если же во время передачи кадра появляется конфликтная ситуация, то передача прерывается и затем, после прослушивания, возобновляется снова. Время задержки включения станции после коллизии вычисляется различными способами. Наиболее часто это время выбирается случайно.

Минимальная длина кадра выбирается таким образом, чтобы при возникновении коллизии на максимальном удалении от передатчика, т.е. в месте подключения самой дальней станции, и достижении сигнала коллизии передающей станции, передача кадра не была бы завершена. Минимальное количество бит в кадре можно определить из соотношения

$$N_{\text{П мин}} = B \cdot t_{\text{ок}} = 2Bd / v.$$

Здесь  $B$  – скорость передачи сигналов (Бод);  $d$  – длина кабельного сегмента;  $v$  – скорость распространения сигнала в линии связи, которая в среднем равна 200 000 км/с.

Максимальная длительность кадра ограничивается величиной 1500 байт.

Для устранения явления коллизий в локальных сетях с шиной топологией разработан детерминированный (неслучайный) метод доступа. Этот метод характеризуется тем, что в нем право использования среды с топологией шины передается от станции (узла) к станции *организационным* способом, а не *состязательным* путем. Право работы с каналом реализуется посредством посылки специального кадра разрешения – **маркера**. Станция, получившая маркер (англ. *Token*), может начинать передачу данных, и после ее завершения пересылает маркер следующей, в порядке увеличения адресов, станции. Маркер передается по логическому кольцу и, достигнув станцию с максимальным адресом, вновь поступает на станцию с наименьшим адресом. Такая процедура управления носит название **передача по логическому кольцу**.

Большую часть времени аппаратура канального уровня находится в состоянии прослушивания. Если заголовок приходящего кадра в адресной части содержит адрес узла, то канальный уровень переходит в состояние приема кадра. При условии, что принятый кадр является кадром пакета данных, сетевой уровень информируется о приеме, а канальный уровень возвращается в состояние прослушивания.

Однако если принятый кадр является маркером, то это означает, что узел получает право передачи в среду. В случае наличия на узле информации, подлежащей передаче, состояние станции переходит в активный режим, при котором производится передача пакета. По окончании передачи в канал выдается маркер маркер. Передача маркера происходит также в случае отсутствия на станции пакета данных, подлежащих передаче. После передачи маркера узел снова переключается в режим прослушивания.

Помимо передачи маркера схема с шиной должна решать *проблему потери маркера и реконфигурации* кольца. Потеря маркера может произойти из-за повреждения одной из станций логического кольца. В некоторый момент времени маркер приходит в поврежденный узел, но узел не пропускает его дальше, и другие станции по этой причине не получают маркер. *Реконфигурация* кольца выполняется, когда в логическое кольцо добавляется или из него удаляется один из узлов.

При потере маркера или сбое в сети все узлы переходят в состояние ожидания (бездействия). Время ожидания каждой из рабочих станций различное и выбирается пропорционально ее номеру. То есть, после отключения компьютеров первой возбудится станция с наименьшим адресом. Она формирует маркер и посылает его следующему компьютеру в сети, начиная с узла, адрес которого на 1 больше его собственного. Приход маркера активизирует вызываемый узел, и он сам начинает опрос сети, что является признаком восстановления сети.

Кроме локальных сетей с шинной топологией и логическим кольцом существуют сети кольцевой структурой и маркерным доступом. Основное различие между такой схемой и двумя предыдущими заключается в физической топологии среды. В кольцевой среде сигналы, переданные одним из компьютеров сети, распространяются через однонаправленные двухточечные линии между станциями, которые соединяются последовательно, образуя физическое кольцо (рисунок 10.2). Во время передачи по кольцевой среде сигналы проходят через станции от приемного к передающему порту. При этом станции могут анализировать и модифицировать приходящие сигналы. Преимуществом такого решения является возможность увеличения длины соединительных линий за счет усиления и ретрансляции сигналов на узлах. Однако повреждение одной из станций или ка-

бельного сегмента физического кольца приводит к выводу из строя всей сети. При ретрансляции сигналов узел вносит задержку, которая равна длительности единичного элемента сигнала.

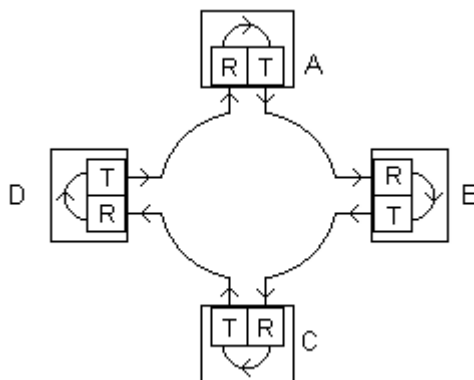


Рисунок 10.2 – Топология физического кольца

Как и в случае шинной структуры с передачей маркера, в схеме доступа к кольцевой среде в качестве маркера используется специальный укороченный кадр, у которого имеется **бит-индикатор Т (Token)** признака маркера. Первые два байта маркерного и информационных кадров полностью совпадают по формату. Если бит Т установлен в единицу, то кадр является маркером, в противном случае дальнейшая последовательность воспринимается как информационный кадр. Если ни у одного из узлов сети нет пакета данных для передачи, маркер непрерывно циркулирует по кольцу. Такой кадр носит название *свободного маркера*.

Узел, в котором имеется пакет данных для передачи, должен ждать, пока он не получит свободный маркер. В момент прихода свободного маркера станция переходит в режим передачи, изменяет состояние маркера на занятое ( $T=0$ ) и передает маркер дальше по кольцу, добавляя к нему информационную и служебную часть кадра.

Кадр данных, вместе с занятым маркером, передается по всему кольцу. Модифицировать значение маркера снова на свободное может только тот узел, который изменил его на занятое. В каждом кадре данных содержится адрес узла назначения. Все узлы кольца, за исключением узла источника, обнаружив занятый маркер ( $T=0$ ), ретранслируют кадр, а принимает его только узел назначения. Таким образом, на узле назначения принимаемый кадр фиксируется (копируется) и вместе с маркером передается далее по кольцу.

Когда занятый маркер, вместе с остальной частью кадра, возвращается в узел источника, состояние маркера меняется на свободное, а пакет удаляется из кольца (не передается дальше). Как только маркер становится свободным, любой узел может изменить его на занятый и начать передачу данных.

### 10.3. Общая характеристика сетей Ethernet и Token Ring

Из нескольких десятков типов систем проводных соединений в ЛКС лидируют два стандарта: **802.3 (Ethernet)** и **802.5 (Token Ring)**. Спецификации 802.3 и 802.5 – стандарты, разработанные организацией IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*).

Важной чертой стандартов является их открытость, то есть они не контролируются каким-либо разработчиком аппаратуры.

Стандарт 802.3 (*Ethernet*) был разработан в 1975 г. на основе сетевой системы, созданной фирмами Xerox и DEC. Исходная система называлась *Ethernet*. Основные причины популярности *Ethernet* заключаются в следующем:

- стандарт *Ethernet* утвержден значительно раньше *Token Ring*;
- *Ethernet* обеспечивает высокую производительность при приемлемой стоимости;
- *Ethernet* является неотъемлемым компонентом локальных компьютерных сетей, поставляемых многими производителями.

Технология *Token Ring*, разработанная фирмами IBM и *Texas Instruments*, утверждена в качестве стандарта 802.5 IEEE в 1985г. (Слово *Token* означает – маркер). Стандарты семейства IEEE 802.x охватывают только два нижних уровня семиуровневой модели OSI – *физический и канальный*. Старшие уровни, начиная с сетевого, имеют общие признаки как для локальных, так и для глобальных сетей.

Существующие локальные компьютерные сети могут функционировать как в *однополосном* режиме (передача сигналов только одного источника) и в *широкополосном* (передача сигналов нескольких источников одновременно). Сети *Ethernet* и *Token Ring* являются однополосными. Важнейшие отличительные особенности этих сетей - методы передачи сообщений и способы обеспечения их целостности, а также способы организации кабельных соединений.

Сеть *Ethernet* относится к сетям множественного доступа с прослушиванием линии и обнаружением коллизий CSMA/CD. Стандартная скорость передачи данных по кабелям связи 10, 100, 1000 и 10000 Мбит/с. Основным недостатком технологии *Ethernet* - наличие коллизий; и второе – повреждения кабеля приводит к выходу из строя всей сети.

Технология *Token Ring* была разработана с целью преодоления указанных недостатков. Она обеспечивает регулярность передачи сообщения для каждой станции в сети. К тому же схема кабельных соединений для *Token Ring* облегчает локализацию большей части неполадок. Стандартная скорость передачи 4 и 16 Мбит/с.

Структура стандартов IEEE 802.x изображена на рисунке 10.3. Канальный уровень дополнительно подразделяется на подуровни *управления логической передачей данных LLC (Logical Link Control)* и *управления доступом к физической среде MAC (Media Access Control)*. Подуровень LLC обеспечивает интерфейс протокола *Ethernet* с протоколами вышележащих уровней, например, с IP или IPX. Он регламентирует передачу кадров данных между узлами с различной степенью надежности. Через этот подуровень сетевой протокол запрашивает у канального уровня нужную ему транспортную операцию с требуемым качеством. Введение уровня MAC вызвано наличием в локальных сетях разделяемой среды передачи сигналов, которая *попеременно* используется парой компьютеров – источником и получателем. Формат кадра LLC, изображен на рисунке 10.4.

Поля кадра LLC имеют следующие назначения: **DSAP** (*Destination Service Access Point*) – адрес точки входа службы назначения; **SSAP** (*Source Service Access Point*) - адрес точки входа службы источника; **Control** – управляющее поле; **OUI** (*Organizationally Unique Identifier*) – идентификатор организации, которая контролирует коды протоколов в поле Type; **Type** – состоит из двух байт и повторяет по назначению аналогичное поле кадра *Ethernet*.

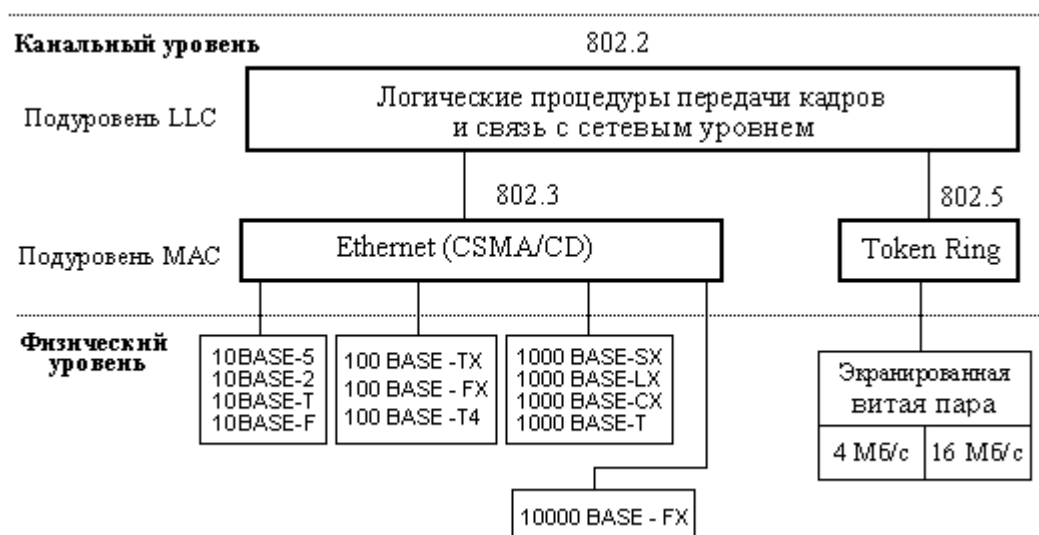


Рисунок 10.3 – Структура стандартов IEEE 802.x

Кадр LLC вкладывается в кадр MAC, и позволяет за счет полей DSAP и SSAP идентифицировать адрес сервисов назначения и источника соответственно. Например, при вложении в кадр LLC пакета IPX, значения как DSAP, так и SSAP должны быть равны E0h.

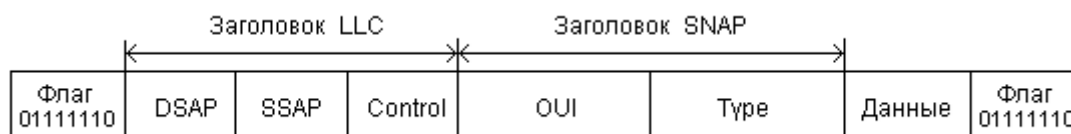


Рисунок 10.4 — Формат кадра управления логическим каналом LLC

Поле управления кадра LLC позволяет реализовать процедуры обмена данными трех типов:

1) Процедура типа 1 определяет обмен данными без предварительного установления соединения и без повторной передачи кадров в случае обнаружения ошибочной ситуации, то есть является процедурой дейтаграммного типа. Именно этот тип процедуры и используется во всех практических реализациях *Ethernet*. Поле управления для этого типа процедур имеет значение 03, что определяет все кадры как нумерованные;

2) Процедура типа 2 определяет режим обмена с установлением соединений, нумерацией кадров, управлением потоком кадров и повторной передачей ошибочных кадров. В данном режиме протокол LLC аналогичен протоколу HDLC. В локальных сетях *Ethernet* этот режим используется редко;

3) Процедура типа 3 задает режим передачи данных без установления соединения, но с получением подтверждения о доставке информационного кадра адресату. Только после такого подтверждения может быть отправлен следующий информационный кадр.

С целью устранения различий в кодировках типов протоколов, сообщения которых вложены в поле данных кадров *Ethernet*, был разработан **протокол доступа к подсетям SNAP** (*Subnetwork Access Protocol*), расширяющий формат кадра LLC. В случае исполь-



зования расширения SNAP в поля DSAP и SSAP записывается значение AA. Тип кадра по-прежнему равен 03. Для обозначения типа протокола, вложенного в поле данных, используются следующие 4 байта, причем байты идентификатора организации (OUI) всегда равны 00 (за исключением протокола *AppleTalk*). Последний байт (TYPE) содержит идентификатор типа протокола (например, 0800 для IP). С помощью заголовка SNAP достигается совместимость с кодами протоколов различных типов кадров *Ethernet*.

Заголовок SNAP является дополнением к заголовку LLC, поэтому он допустим не только в кадрах *Ethernet*, но и в кадрах протоколов других технологий стандарта 802.

#### 10.4. Архитектура локальной сети Ethernet

В основе наиболее часто применяемых в настоящее время локальных сетей лежит сеть Ethernet, архитектура которой разработана компанией DEC с участием *Xerox* и *Intel Corporation*. Построение и функционирование сети регламентируется стандартом IEEE 802.3. Классической версией Ethernet является стандартная сеть на скорость 10 Мбит/с, работающая в полудуплексном режиме. В ее состав входят разновидности сетей, обозначаемые 10BASE-5, 10BASE-2 и 10BASE-T. Здесь цифра 10 означает скорость передачи в Мбит/с, "BASE" — что сигналы передаются в основной полосе (без переноса спектра). Последние символы отображают либо вид линии (Т-витая пара, F-оптическая), либо округленную максимальную длину кабельного сегмента (в сотнях метров).

Самой распространенной версией Ethernet является сеть **10BASE-T**, передача данных, в которой осуществляется со скоростью 10 Мбит/с по неэкранированной витой паре. Обычно топология такой сети имеет вид звезды, лучи которой расходятся из центра кабельных соединений.

Вторым вариантом является **10BASE-2**. Применяется коаксиальный кабель для создания топологии типа "общая шина". Максимальная длина сегмента приблизительно 185 м. Поскольку используется тонкий коаксиальный кабель ( $d \approx 6$  мм), то ее часто называют **ThinNet** (*тонкая сеть*).

**10BASE-5**, называется стандартной Ethernet. Использует шинный вариант сети. Применяется более толстый ( $d \approx 12$  мм), коаксиальный кабель. Сеть часто называют **ThickNet** (*толстая сеть*). Такой кабель допускает длину сегмента до 500 м и он лучше защищен от помех.

Имеются варианты сетей с использованием волоконно-оптических кабелей **10BASE-F**. Длина линии связи в таких сетях достигает 2 км.

Во всех сетях Ethernet применяется метод коллективного (поочередного) доступа к среде с опознаванием несущей и обнаружением коллизий CSMA/CD, характерный для топологии общей шины. Данные, подлежащие передаче по сети, помещаются в кадр, в котором указывается адрес станции назначения и отправителя. Прежде чем начать передачу станция прослушивает линию на предмет наличия в ней гармоника сигнала данных (т.н. "несущей"). В случае отсутствия несущей станция начинает передавать кадр в линию (рисунок 10.5). На рисунке показано, что сначала кадр передает станция 1. Передаваемый кадр поступает на приемники всех станций, подключенных к кабельному сегменту. Компьютер, сетевой адрес которого совпадает с адресом получателя, указанного в пакете, копирует его в свой буфер.

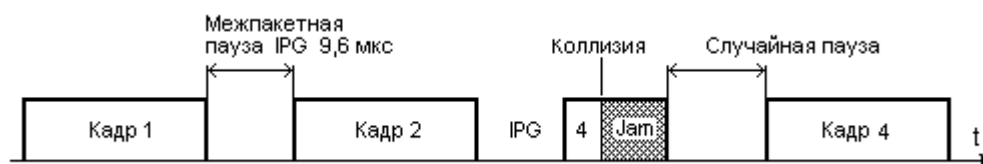


Рисунок 10.5 –Временная диаграмма передачи кадров в сети Ethernet

По окончании передачи кадра все узлы должны выдержать технологическую **межпакетную паузу IPG** (*Inter Packet Gap*), продолжительность которой установлена 9,6 мкс. Эта пауза предназначена для завершения переходных процессов в приемопередатчиках сетевых адаптеров, а также для исключения захвата сегмента одной и той же станцией. Даже если в компьютере имеется несколько кадров для передачи и данный узел является единственным передающим, то после пересылки каждого пакета он должен сделать паузу длиной не менее чем интервал IPG.

По завершении межпакетной паузы линию занимает станция, в которой имеются данные для передачи. В случае попытки нескольких станций одновременно начать передачу возникает коллизия. Передающая станция, первая обнаружившая коллизию (на рисунке 3.2.1 станция 4), прекращает передачу и посылает в линию специальную 32-х битовую *последовательность индикации коллизии Jam* (от англ. - *затоп*), которая способствует повышению надежности распознавания коллизии всеми станциями сети. Станции, обнаружившие коллизию, переключаются в состояние ожидания. Продолжительность интервала ожидания для каждого из компьютеров устанавливается случайной, по истечении которого любая из станций может попытаться захватить среду и передать кадр. Длительность случайной паузы  $T_{\text{сп}}$  определяется в соответствии с выражением

$$T_{\text{сп}} = L \times 512 \tau_0,$$

где  $\tau_0$  – длительность единичного (битового) интервала.

Для сети Ethernet со скоростью передачи 10 Мбит/с  $\tau_0 = 0,1$  мкс, а для скорости 100 Мбит/с  $\tau_0 = 0,01$  мкс.  $L$  представляет собой целое число, выбранное с равной вероятностью из интервала  $[0, 2^{N_{\text{пп}}}]$ , где  $N_{\text{пп}}$  – номер повторной попытки передачи данного кадра, изменяющийся с каждой попыткой от 1 до 10. После десятой попытки интервал, из которого выбирается пауза, не увеличивается. Следовательно, случайная пауза может принимать значение от 0 до 52,4 мс. Если 16 последовательных попыток передачи кадра каждый раз приводят к коллизии, то передатчик должен прекратить попытки и отбросить этот кадр.

Для предотвращения снижения пропускной способности сети Ethernet, при появлении временных сбоев в функционировании сетевых интерфейсных карт, применяется процедура *Jabber Control*. Она предназначена для исключения возможности возникновения ситуации, при которой одна рабочая станция или сегмент монополизирует процесс информационного обмена во всей сети. Согласно процедуре *Jabber Control* каждой станции разрешено работать со средой ограниченное время. По истечении установленного допустимого интервала активности на аппаратном уровне осуществляется прерывание процесса передачи данных, и рабочая станция или сегмент сети переводятся в пассивное состояние. Возобновление процесса передачи данных данной станцией или сегментом

сети невозможно до истечения установленного интервала задержки. Величины допустимого интервала активности установлены для рабочей станции от 20 до 150 мс, а для повторителя (3-7,5) мс. Время задержки повторной передачи находится в пределах (500 - 2500) мс для рабочей станции и (9,6 -11,6) мкс для повторителя.

В сети Ethernet используется несколько типов кадров:

- стандартный Ethernet II (разработчик DIX – фирмы *Digital-Intel-Xerox*);
- RAW 802.3 Ethernet (разработчик фирма *Novell*);
- IEEE 802/2 SNAP Ethernet (*SubNetWorkAccessProtocol*). Его задача - устранить различия в кодировках типов протоколов.

Все типы кадров (рисунок 10.6) содержат преамбулу, кодовую комбинацию СтРБ "Стартовый разделитель блока" (*Start of Frame Delimiter*), адреса получателя и отправителя, поле типа и длины кадра, информационное поле и контрольную последовательность кадра (КПК).



Рисунок 10.6 – Формат кадра сети Ethernet

**Преамбула** используется для целей синхронизации приемника по тактам и состоит из 7 байт вида 1010101010.

**Байт СтРБ** представлен комбинацией 10101011. Появление его означает начало кадра. Он служит для маркерной синхронизации по циклам.

**Адрес получателя** имеет длину 6 байт. Первый бит старшего байта адреса является признаком индивидуального (0) или группового (1) адреса. **Адрес отправителя** также состоит из 6 байт, причем старший бит адреса имеет всегда нулевое значение.

Поле "**Длина/Тип**" – состоит из двух байт и содержит сведения о длине поля данных. Для некоторых типов кадров (Ethernet II) оно определяет тип используемого протокола верхнего уровня. Если в поле записан код менее 1500, то это поле характеризует длину кадра. В противном случае - это код протокола, пакет которого инкапсулирован в кадр Ethernet.

Поле "**Данные**" должно содержать от 46 до 1500 байт данных. Если данных менее 46 байт, то поле дополняется символами заполнения.

Поле "**КПК**" - контрольная последовательность кадра, образуется в результате циклического кодирования и содержит инверсию остатка от деления на образующий полином 32-й степени вида:

$$P(x) = x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1.$$

Таким образом, минимальная длина кадра без преамбулы содержит 64 байта (512 бит). Эта величина определяет максимально допустимую двойную задержку распространения сигнала по сети в 512 битовых интервала. Стандартом предполагается, что преамбула может уменьшаться при прохождении кадра через различные сетевые устройства,

поэтому она в расчет не принимается. Максимальная длина кадра равна 1518 байтам. Этот параметр учитывается при расчете объема буферной памяти сетевого оборудования. В процессе передачи кадров непрерывно контролируется их размер. Если поступивший кадр короче 64 или длиннее 1518 байтов, то он отбрасывается.

Передача единичных элементов кадра осуществляется старшими битами вперед сигналами с манчестерским линейным кодированием.

В настоящее время все сетевые адаптеры, их драйверы, мосты, коммутаторы и маршрутизаторы могут работать со всеми используемыми на практике форматами кадров, а распознавание их типов происходит автоматически.

Из классических сетей Ethernet наибольшего распространения получила тонкая Ethernet типа 10BASE-2. В качестве среды в сети 10BASE-2 используется "тонкий" коаксиальный кабель наружным диаметром около 6 мм, в то время как у толстой Ethernet (10BASE-5) применялся кабель диаметром 12 мм. Длина кабеля связи (сегмента) у тонкой Ethernet не должна превышать 185 метров. Каждый сегмент в среде Ethernet считается отдельной сетью. К сегменту 10BASE-2 разрешается подключать не более 30 станций. Структура "тонкой" Ethernet показана на рисунке 10.7.

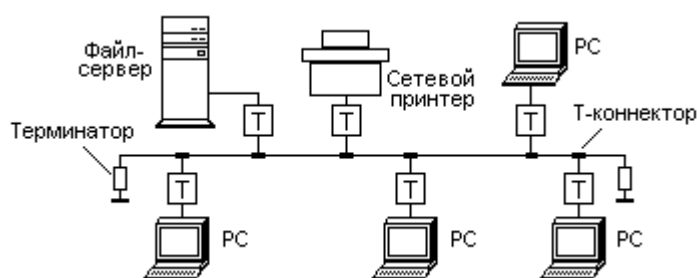


Рисунок 10.7 – Схема тонкой Ethernet 10BASE-2

Сеть имеет топологию шины. Каждая рабочая станция PC подключается к линии связи через трансивер Т. Задачей трансивера (*приемо/передатчика*) является подключение к среде и обнаружение коллизий. Практически во всех 10BASE-2 трансиверы встроенные в сетевую интерфейсную плату (сетевой адаптер). Расстояние между трансиверами в кабельном сегменте "тонкой" Ethernet должно составлять не менее 50 см. Подключение трансивера к кабелю осуществляется через Т-образный коаксиальный разъем (Т-коннектор). Соединение сегментов осуществляется разъемом со штыковым креплением типа BNC (*Bayonet Nut Connector*).

Для исключения появления отраженных волн, на концах сегментов включается нагрузочный резистор (*терминатор*), имеющий сопротивление, равное волновому сопротивлению тонкого коаксиального кабеля (50 Ом). Конструктивно он вмонтирован в разъем коаксиального кабеля типа РК50-9-11.

Как и в толстой сети, несколько сегментов тонкой сети могут быть соединены в единую сеть с помощью повторителей. Стандартом разрешается использование в сети не более 5 сегментов, из них два должны быть ненагруженными. Очевидно, что в этом случае устанавливается четыре повторителя. Компьютеры можно подключать только к трем сегментам. Два промежуточных сегмента увеличивают диаметр сети.

Самой распространенной разновидностью локальной компьютерной сети Ethernet явилась сеть на основе витой пары – 10BASE-T. В этой сети используется топология “звезда”. В роли центрального узла сети выступает *концентратор (хаб – от англ. Hub)*. Он представляет собой многопортовый повторитель, который передает полученные пакеты во все свои выходные порты, за исключением порта источника пакета, независимо от адресата получателя. В качестве физической среды применялся телефонный неэкранированный провод (витая пара). Длина отвода между компьютером и концентратором не должна превышать 100 м. Рабочие станции подключаются с помощью стандартного сетевого разъема типа RJ-45 к кабельному концентратору. Трансивер располагается на сетевой плате, в то время как у толстой сети он выполнялся в виде внешнего блока, закреплявшегося на сегменте кабеля.

С точки зрения производительности концентраторы просто передают пакеты с использованием всей пропускной способности (полосы) линии связи. Задержка, вносимая повторителем весьма мала (в соответствии с IEEE 802.3 – менее 3 мкс). Сети, содержащие концентраторы, имеют пропускную способность 10 Мбит/с подобно сегменту на основе коаксиального кабеля и прозрачны для большинства сетевых протоколов, таких как TCP/IP и IPX. При попытке передачи пакетов несколькими станциями одновременно возникает коллизия. В этом случае концентратор выдает соответствующую Jam-последовательность на все выходные порты.

Следует заметить, что концентратор в процессе функционирования сети не только транслирует кадры, но и осуществляет контроль состояния линий связи с компьютерами, отключая их в случае обрыва или короткого замыкания. При этом он может выдавать администратору диагностическое сообщение о возникших неисправностях.

Путем соединения концентраторов 10BASE-T друг с другом, можно создать иерархическую структуру сети (рисунок 10.8). Общее количество рабочих станций в такой сети не должно превышать 1024. При этом следует придерживаться правила: между любыми двумя станциями сети должно находиться не более четырех повторителей.

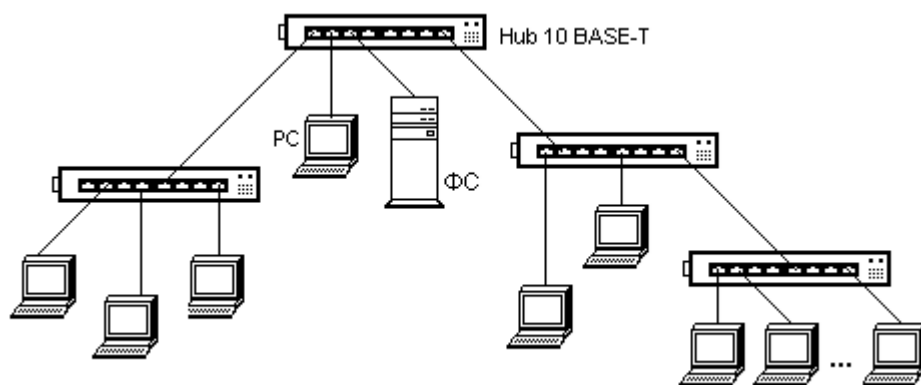


Рисунок 10.8 – Иерархическая структура сети 10BASE-T

Недостатком сети на основе концентратора, как и любой сети с шинной топологией, является возможность осуществлять обмен данными в одно и то же время только между двумя компьютерами, в противном случае возникают коллизии. Таким образом, в сети со звездной топологией в течение сеанса связи между компьютерами оказываются

занятыми только два кабельных сегмента, а остальные не используются. Для устранения этого недостатка были разработаны сетевые коммутаторы, заменившие хабы в сетях 10BASE-T.

### Рекомендуемая литература

1. Дибров М.В. Сети и телекоммуникации. Маршрутизация в IP–сетях. В 2 ч. Часть 2: учебник и практикум для академического бакалавриата / М.В. Дибров. – М.: Изд-во Юрайт, 2019. – 351 с.  
<https://biblio-online.ru/book/seti-i-telekommunikacii-marshrutizaciya-v-ip-setyah-v-2-ch-chast-2-437865>
2. Олифер В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В.Г., Олифер, Н.А. Олифер. — СПб: Изд-во «Питер», 2013. — 958 с.
3. **Основы формирования, передачи и приема цифровой информации:** Учебное пособие / В. И. Лузин, Н.П. Никитин, В.И. Гадзиковский. - М.: СОЛОН-Пр., 2014. - 316 с.: 70х100 1/16. (обложка) ISBN 978-5-321-01961-0.  
<http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=493066>
4. Сети и телекоммуникации: учебник и практикум для академического бакалавриата / Под ред. К.Е. Самуйлова, И.А. Шалимова, Д.С. Кулябова. – М.: Изд-во Юрайт, 2016. – 363 с. <https://biblio-online.ru/book/seti-i-telekommunikacii-432824>
5. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б.Скляр. – М.: Изд-во "Вильямс", 2003. – 1104 с.
6. Чернега В.С. Компьютерные сети / В.С. Чернега, Б. Платтнер. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. — 500 с.