

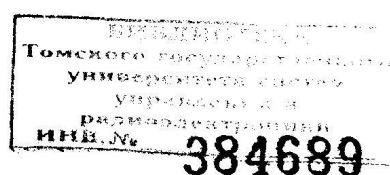
Федеральное агентство по образованию

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

**А.В. Пуговкин**

# **ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ**

**Учебное пособие**



Томск  
ТУСУР  
2007

УДК 654.15(075.8)  
ББК 32.882я73  
П88

**Пуговкин А.В.**

П88      Телекоммуникационные системы : учеб. пособие / А.В. Пуговкин.  
– Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007.  
– 202 с.

ISBN 5-86889-337-9

Изложены основные принципы построения телекоммуникационных систем, дана их классификация, приведены характеристики сигналов и каналов электрической связи.

Рассмотрены аналоговые системы передачи на базе частотного разделения каналов, цифровые системы передачи (способы неравномерного квантования, формирования линейных кодов, плезиохронная и синхронная цифровая иерархия). Изложены принципы действия и приведены основные характеристики линий связи.

Особое внимание уделено цифровым системам коммутации и системам распределения информации в сетях передачи данных. Представлены сети доступа: мультиплексоры, мини-АТС, модемы, локальные вычислительные сети. Рассмотрены перспективы развития телекоммуникационных сетей.

Для студентов, обучающихся по направлениям «Радиотехника», «Телекоммуникации», «Электроника».

УДК 654.15(075.8)  
ББК 32.882я73

ISBN 5-86889-337-9

© Томск. гос. ун-т систем упр.  
и радиоэлектроники, 2007  
© Пуговкин А.В., 2007

## Содержание

Введение .....	8
1. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ (ТС).....	19
1.1 Каналы, тракты, системы и сети передачи информации...	19
1.2 Основные принципы построения телекоммуникационных сетей .....	23
1.2.1 Функциональные признаки .....	24
1.2.2 Иерархические признаки (территориальные) .....	26
1.2.3 Стандартизация телекоммуникационных сетей и систем .....	28
1.2.4 Социально-экономические проблемы построения ТСС	31
2. СИГНАЛЫ И КАНАЛЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВЯЗИ.....	33
2.1 Сигналы электросвязи.....	33
2.1.1 Энергетические характеристики сигналов.....	33
2.1.2 Временные и спектральные характеристики первичных сигналов электросвязи .....	34
2.1.3 Параметры сигнала с точки зрения его передачи по каналу связи.....	35
2.1.4 Сравнительная характеристика сигналов электросвязи	37
2.2 Двусторонняя передача .....	37
2.2.1 Двусторонняя передача с 4-х проводным окончанием .....	37
2.2.2 Двусторонняя передача с 2-х проводным окончанием .....	38
2.3 Каналы связи.....	40
2.3.1 Аналоговые типовые каналы.....	40
3. СИСТЕМЫ СВЯЗИ С ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ (ЧРК).....	43
3.1 Формирование канальных и групповых сигналов .....	43
3.2 Организация линейных трактов .....	47
3.2.1 Выбор числа каналов .....	47
3.2.2 Методы организации двусторонних трактов .....	48
3.3 Коррекция линейных искажений .....	50
3.4 Помехи в аналоговых системах передачи.....	54
3.4.1 Классификация помех.....	54
3.4.2 Оценка действия помех.....	55
3.4.3 Нормирование помех (по ITU-T).....	55

3.4.4	Накопление собственных помех в линейном тракте .....	57
3.4.5	Переходные помехи .....	59
3.4.6	Нелинейные помехи .....	61
4	ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ (ЦСП).....	63
4.1	Принципы цифровой передачи информации .....	63
4.1.1	Структурная схема ЦСП.....	63
4.1.2	Цифровой сигнал.....	63
4.1.3	Группообразование .....	67
4.1.4	Линейное кодирование .....	67
4.1.5	Модуляция .....	69
4.1.6	Оконечная станция ЦСП .....	69
4.1.7	Достоинства и недостатки ЦСП.....	70
4.2	Компандирование в ЦСП.....	72
4.3	Линейные коды .....	78
4.4	Синхронизация в ЦСП .....	83
4.4.1	Тактовая синхронизация.....	85
4.4.2	Цикловая синхронизация.....	87
4.5	Формирование группового сигнала .....	90
4.5.1	Межсимвольные искажения.....	90
4.5.2	Первичный цифровой сигнал (ИКМ-30) .....	94
4.6	Шумы и помехи в цифровых системах передачи.....	977
4.6.1	Шумы дискретизации .....	988
4.6.2	Шумы квантования .....	1000
4.6.3	Шумы незагруженного канала .....	1022
4.6.4	Шумы ограничения .....	1033
4.7	Объединение цифровых потоков.....	1044
4.8	Плезиохронная цифровая иерархия .....	107
4.9	Синхронная цифровая иерархия (SDH) .....	109
5.	Линии связи.....	122
5.1	Кабельные линии связи.....	122
5.2	Линии связи на симметричном кабеле.....	122
5.3	Коаксиальные кабели .....	132
5.4	Волоконнооптические кабели.....	134
6	Распределение информации в цифровых системах передачи	141
6.1	Коммутация каналов и коммутация пакетов .....	141

6.2 Пространственная коммутация .....	144
6.3. Временная коммутация .....	150
6.4. Многозвенные системы коммутации. ....	152
6.5 Распределение информации в сетях передачи данных.....	157
6.5.1 Сети с коммутацией пакетов .....	157
6.5.2 Множественный доступ с контролем несущей и обнаружением коллизий .....	158
6.5.3 Сети с коммутацией пакетов .....	160
6.5.4 IP сети.....	162
6.5.5 Виртуальные соединения.....	164
7 Сети доступа.....	168
7. 1 Понятие сетей доступа .....	168
7.2 Доступ к телефонным сетям .....	169
7.3 Цифровые сети доступа.....	170
7.3.1. Абонентские линии .....	170
7.3.2. Цифровые коммутируемые линии. ....	171
7.3.3 Цифровые линии xDSL .....	175
7.3.4 Системы передачи (соединительные линии) .....	181
7.3.5 Узлы доступа. ....	182
7.4 Доступ к сетям передачи данных .....	188
7.5 Интеграция услуг и сетей доступа.....	189
7.5.1 Интеграция с помощью цифровых каналов (технология ВРК).....	189
7.5.2 IP – телефония (Технология коммутации пакетов).....	191
8. Основы построения и перспективы развития телекоммуникационных сетей. ....	197
8.1 Планирование сетей. ....	197
8.2 Примеры телекоммуникационных сетей. ....	198
8.2.1 Цифровая телекоммуникационная сеть SDH.....	198
8.2.2 Сеть передачи данных .....	199
8.3. Перспективы развития сетей. ....	202
Список использованной и рекомендуемой литературы. ....	214

**Пуговкин А. В.**

**Основы телекоммуникаций (аннотация)**

Любая телекоммуникационная система может быть разделена на системы передачи и системы распределения, причем системы передачи являются универсальной средой как для сетей электросвязи (телефония, телевидение), так и для сетей передачи данных

В основу учебного пособия положена курс лекций, читаемых автором по дисциплине «Основы построения телекоммуникационных систем и сетей» на радиотехническом факультете и «Телекоммуникационные системы и компьютерные сети» на факультете вычислительных систем Томского университета систем управления и радиоэлектроники.

В первой главе описаны основные принципы построения телекоммуникационных систем, дана их классификация, представление о модели взаимодействия открытых систем и о применении ее в телекоммуникациях.

Вторая глава посвящена сигналам и каналам электрической связи. Здесь даны определения и значения энергетических, временных и спектральных характеристик телекоммуникационных сигналов. Рассмотрены канал тональной частоты, первичный цифровой канал, двухсторонние и односторонние линии передачи.

В третьей главе рассмотрены аналоговые системы передачи на базе частотного разделения каналов

Четвертая глава посвящена цифровым системам передачи. Здесь даются способы неравномерного квантования, базовые сигналы, способы формирования линейных кодов. Рассмотрены плезиохронная и синхронная цифровые иерархии.

В пятой главе рассмотрены принципы действия и основные характеристики линий связи, применяющихся в телекоммуникационных системах: многопарные электрические кабели, коаксиальные кабели, волоконнооптические линии, даны их сравнительные характеристики и области применения.

Системы распределения описаны в шестой главе. Особое внимание уделено цифровым системам коммутации как пространственным, так и временным.. Рассмотрены системы распределения для сетей передачи данных: локальные вычислительные сети коммутируемые и некоммутируемые, глобальные сети на основе маршрутизаторов

Седьмая глава посвящена сетям доступа. Рассмотрен доступ к телефонным сетям на базе мультиплексоров, выносных концентраторов, мини АТС. Для сетей передачи данных приведены варианты доступа по коммутируемым телефонным линиям с помощью модемов и модемных пулов, посредством выделенных линий( технологии xDSL), с помощью гибридных коаксиально-волоконнооптических сетей.

Наконец в восьмой главе описаны перспективы развития телекоммуникационных систем и сетей. Они заключаются в развитии цифровых методов передачи, расширении зоны применения волоконной оптики, широком применении технологий коммутации пакетов.

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящее время характеризуется стремительными темпами развития телекоммуникаций.

В течение 10-20 лет в массовые услуги связи вошли доступ в Интернет и сотовая связь, факс и электронная почта. За счет внедрения волоконнооптических линий связи, цифровых систем передачи и объемов представляемого трафика. Появилось много новых телекоммуникационных технологий: ISDN, IP-телефония, ADSL, ATM и др.

Широкое внедрение компьютеров в производственную деятельность и повседневную жизнь также стимулирует развитие телекоммуникаций, требует существенной скорости передачи информации, повышения качества обслуживания. Цифровые методы обработки телекоммуникационных сигналов, цифровых технологий распределения информации и управления сетями приводят к слиянию информационных и телекоммуникационных технологий.

Основные услуги телекоммуникаций можно разделить на следующие виды:

- телеметрия
- телефония
- радиовещание
- передача данных ПД (доступ в Интернет, электронная почта и др.)
- телевидение
- цифровое телевидение

Эти услуги различаются как по необходимой скорости передачи информации, так и по времени сеанса. Эти отличия иллюстрируются рисунком В.1, из которого следует, что самые низкие скорости передачи и время сеанса требуются для телеметрии, когда сигналы с нескольких датчиков (давления, температуры, влажности и т.п.) передаются в центр управления. Самые большие объемы скорости и длительности сеанса необходимы для телевидения (TV), телевидения высокого качества (ТВВК) и скоростного доступа в Интернет. Телефония и радиовещание занимают промежуточное положение.

Важным выводом из этого рисунка является то, что современные телекоммуникационные системы должны обеспечивать одновременно все эти услуги, передавать низкоскоростные и высокоскоростные потоки в одних и тех же каналах связи. Да и по времени



сеанса требования достаточно жесткие, так как системы должны работать практически непрерывно с высокой надежностью.

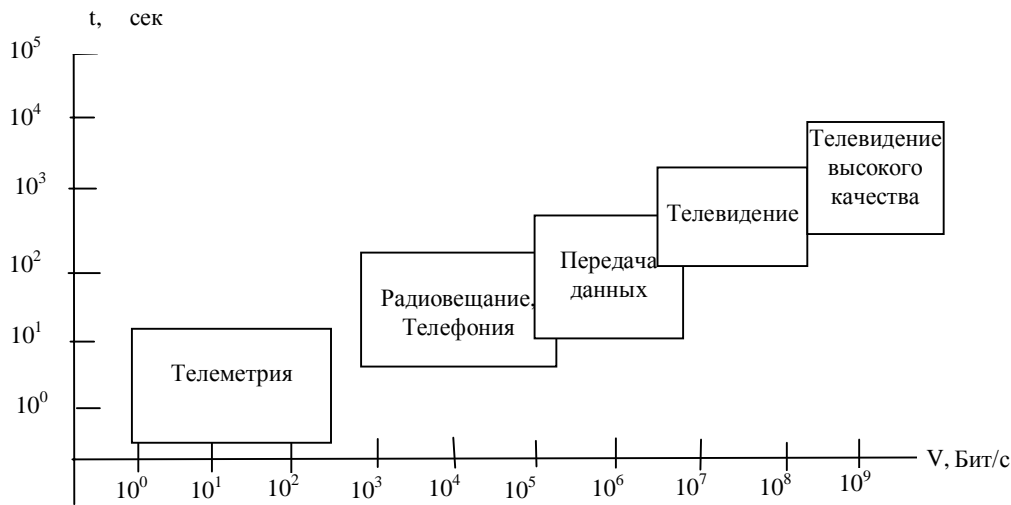


Рисунок В.1 -. Услуги электросвязи

В развитии электросвязи на современном этапе существует ряд тенденций, качественно меняющих понятие и содержание привычных для нас услуг телефонии и телевидения:

1. **Цифровизация.** Переход к цифровым сигналам обеспечивает высокую помехоустойчивость передачи, повышает ее качество и надежность, существенно сокращает вес и габариты оборудования. Поскольку представление цифрового сигнала одинаково для всех видов трафика, то это создает реальную платформу для их объединения в одном канале передачи.
2. **Глобализация.** Практически телекоммуникационные сети приобрели всемирный характер. Это касается и телефонии, когда мы можем связаться с абонентом в любой стране, и передачи данных (сеть Интернет). Примерами глобальных сетей также являются сети сотовой связи (GSM, NMT и др.), сети спутниковой связи (Inmarsat, Global Star и др.).
3. **Персонализация.** С появлением сотовых телефонов, терминалов спутниковой связи телекоммуникации все больше привязываются не к месту нахождения терминала (телефонный аппарат, телевизор и т.п.), а к персоне-человеку, который носит или возит терминал с собой.
4. **Мобильность.** Эта тенденция существовала и раньше, но сейчас она развивается в массовых средствах связи, благодаря развитию технологий радиосвязи, которые яв-

ляются беспроводными, и поэтому обеспечивают услугами абонентов, находящихся в движении, как при перемещении пешком, так и в автомобиле или даже самолете или космическом аппарате.

5. **Интеграция** услуг заключается в том, что к абоненту по одной линии связи приходят электрические сигналы разных служб. Здесь с помощью устройства распределения услуг они разделяются по соответствующим терминальным устройствам (телефонный аппарат, модем, телевизионный приемник и т.д.). Самым радикальным случаем является тот, когда по линии связи одновременно приходят услуги телефонии, телевидения и передачи данных. Однако на настоящий момент для массового абонента такого сервиса еще нет, и на практике применяют попарную интеграцию. Рассмотрим развитие услуг и возможные варианты интеграции с помощью диаграммы (рисунок В.2).

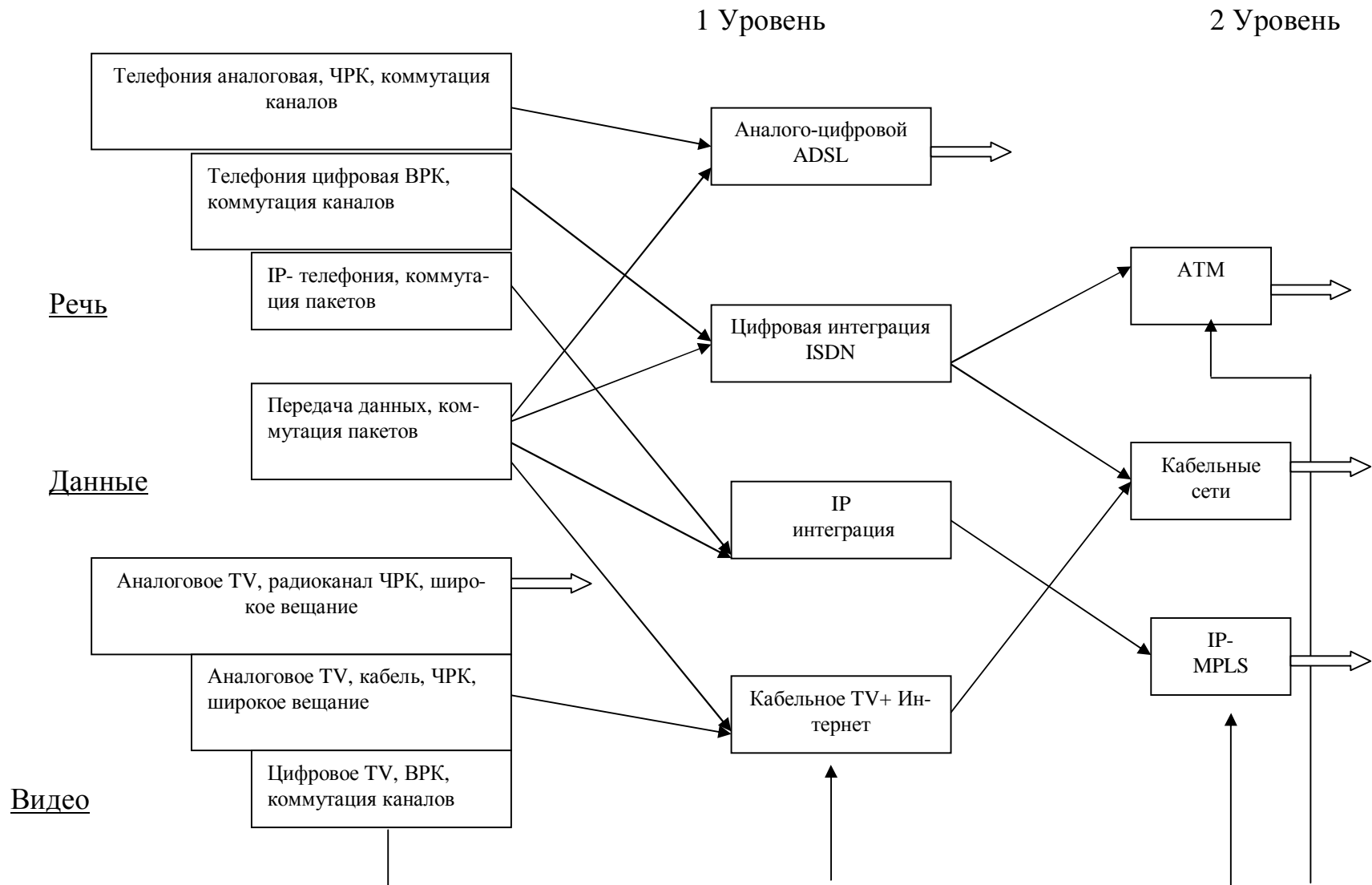


Рисунок В.2 - Развитие и интеграция услуг

Здесь рассмотрены только три услуги, а именно: передача речи, данных и программ телевидения. Рассмотрим зарождение и развитие этих услуг.

1. *Телефония.* Телефонная связь зародилась в 70-е годы 19 века. В качестве пионеров телефонии следует назвать: А.Белла (США) - изобретение телефона (1876 год), М. Махальского (Россия) - изобретение микрофона (1878 год), П. Голубицкого (Россия) - применение центральной батареи для абонентских телефонных аппаратов.

Основные элементы технологии телефонии сохранились и по сей день. Эту телефонную связь называют аналоговой телефонией потому, что в процессе передачи используются аналоговые сигналы, возникающие на выходе телефонной трубки. При объединении сигналов от различных абонентов используется технология от частного разделения каналов (ЧРК). При ЧРК эти сигналы занимают разные непересекающие участки частотного диапазона. Наглядный пример ЧРК: разделение радиовещательных и телевизионных программ. Подробно ЧРК будет рассмотрено в разделе 2.3 при описании модуляции. Соединение абонентов друг с другом осуществляется посредством коммутации каналов (КК), когда между двумя абонентами устанавливается сквозное соединение с помощью коммутаторов. Заказ на установление этого соединения делает сам абонент, набирая номер. Разрыв соединения также происходит по инициативе одного из абонентов. Часто такое соединение называют коммутируемым. Этот вид электрической связи на настоящий момент является самым массовым, несмотря на заметные недостатки: невысокое качество связи, ограниченные возможности интеграции, низкий уровень сервиса.

Широкое внедрение цифровых технологий привело к появлению в электросвязи цифровых систем передачи и цифровой телефонии. Основными отличительными особенностями этой технологии являются: преобразование аналогового телефонного сигнала в цифровой (последовательность импульсных сигналов, передающих значения «0» и «1»), объединение циф-

ровых сигналов разных абонентов с помощью уплотнения их во времени - временное разделение каналов (ВРК). Вместе с тем технология коммутации остается прежней - коммутация каналов.

Наконец, в конце 90-х годов прошлого столетия родилась еще одна телефонная технология - IP-телефония, которая принципиально отличается от предыдущих способом коммутации. Здесь так же, как и в цифровой телефонии формируется цифровой сигнал, но затем он разбивается на пакеты. Каждый пакет содержит в заголовке адрес назначения, поэтому пакеты могут добираться до абонентов самостоятельно.

Но главным достоинством пакетных методов передачи является возможность передавать по одному каналу связи пакеты нескольких пар абонентов одновременно. При этом коэффициент использования канала приближается к 100%. Разумеется, что IP-телефония, как и другие пакетные методы передачи речи, возникли не сами по себе, а на базе технологий передачи данных, технологий компьютерных сетей.

2. *Передача данных.* Этот вид телекоммуникационных услуг появился сравнительно недавно в 60-х годах прошлого века в связи с развитием локальных и глобальных вычислительных сетей. Сначала компьютеры связывались в сети для того, чтобы увеличить общую производительность. Однако вскоре потребовался доступ нескольких компьютеров к общим ресурсам (принтер, серверы и т.п.). Появилась необходимость у компьютерных пользователей обмениваться данными друг с другом. И, наконец, появилась глобальная информационная сеть Интернет. И всем пользователям потребовался выход в нее. Услуга стала массовой. Поскольку передача данных принципиально отличается от телефонии, то и требования к этим сетям совсем другие. Здесь нужна высокая вероятность передачи ( $10^{-8}$  -  $10^{-9}$ ), в то время как малая задержка сигнала, важная для телефонии, здесь не является критичной. Требования по скорости передачи в сетях передачи данных (СПД) изменяются в

широких пределах от нескольких десятков килобит в секунду (Кбит/с) для абонентского доступа до единиц гигабит в секунду (Гбит/с) на магистральных сетях.

3. *Телевидение.* Исторически первым появилось «эфирное» телевидение, когда передатчик телевизионной станции излучает радиоволны для всех абонентов, имеющих телевизионные приемники в зоне действия станции (рисунок.В.3).

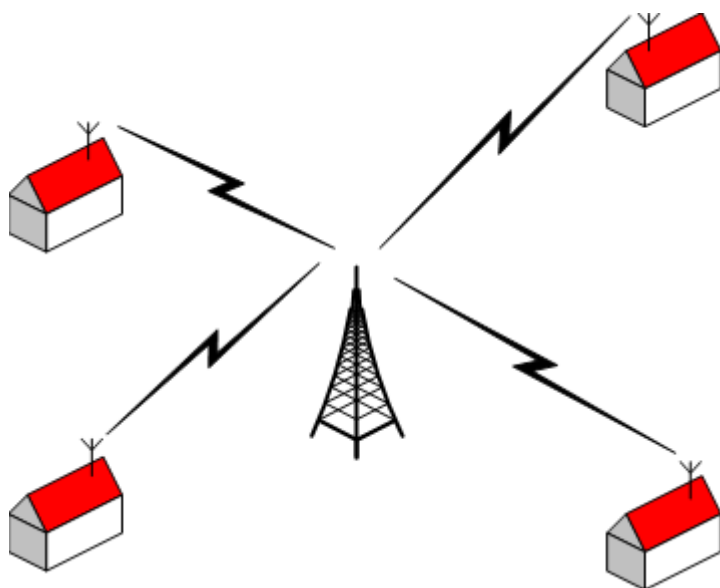


Рисунок В.3 -. Широковещательное «эфирное» телевидение

Такой режим распределения информации называется широковещательным, и он принципиально отличается от режима коммутации, применяемого в телефонии и передаче данных. Сигналы телевидения являются аналоговыми, как и в телефонии, но они имеют гораздо более сложную структуру, потому что телевизионное изображение имеет двумерный формат, речь одномерна (изменяется только во времени). Для того чтобы передавать несколько телевизионных программ используется ЧРК, также как в аналоговой телефонии.

Эта телевизионная услуга сейчас является самой массовой, так как она не требует строительства кабельных линий связи для абонентов. Качество передаваемых изображения и звука здесь не может быть очень

высоким, так как на него влияют условия распространения радиоволн (осадки, многократные отражения от зданий, затенения). Сейчас у «эфирного» телевидения, как у массовой услуги появился конкурент - кабельное телевидение, которое развивается, начиная с 80-х годов 20 века. В его основе также лежат аналоговые сигналы, ЧРК и принцип широкого вещания. Здесь сигналы от головной станции передаются к абонентам по специально проложенной кабельной сети (рисунок В.4).

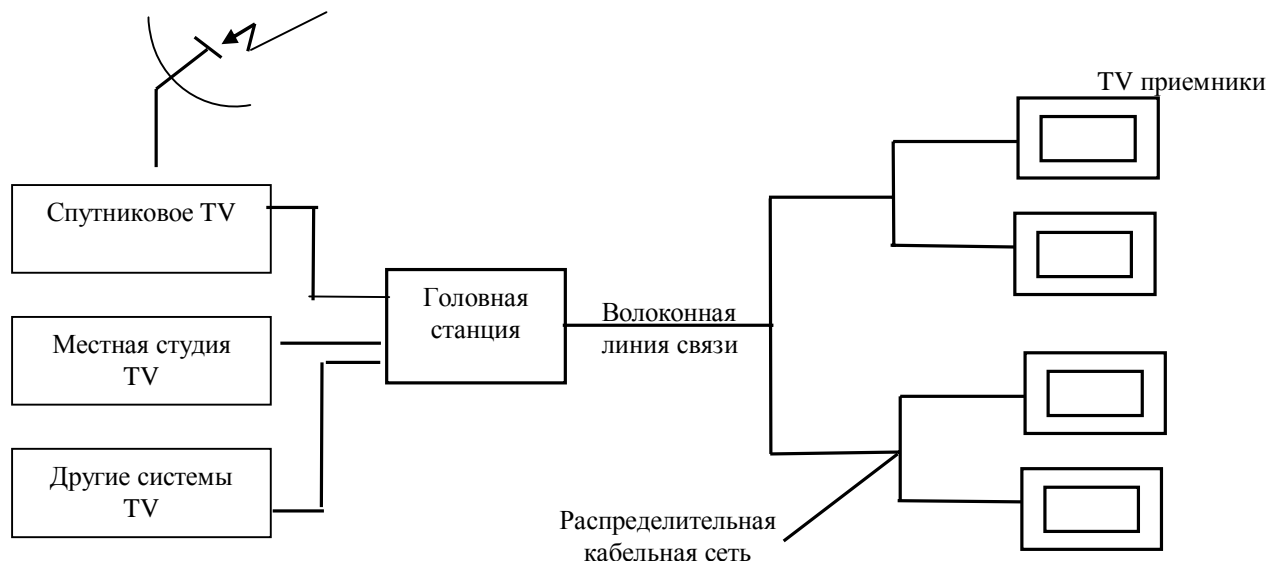


Рисунок В.4 - Системы кабельного телевидения

Это обеспечивает более высокое качество передачи и позволяет услугу сделать платной, так как кабельный ввод в квартиру может быть отключен в случае неуплаты. Телевизионные приемники у абонентов здесь используются те же самые, что и при обычном телевидении.

В ближайшей перспективе появление высококачественной массовой услуги - цифрового телевидения. Она уже реализуется, начиная с 90-х годов прошлого века. В ее основе лежат преобразование аналогового телевизионного сигнала в цифровой, использование ВРК и технологии коммутации каналов. Несомненными достоинствами цифрового телевидения являются высокое качество передачи программ, адресная передача по запросу. Сдерживает массовое внедрение услуги необходимость приобретения специального телевизионного приемника, который пока является достаточно

дорогим. Технологический прогресс в скором времени позволит преодолеть этот недостаток. Способы передачи сигналов цифрового телевидения могут быть самыми разными: по радиоканалам, по сетям кабельного телевидения и даже по телефонным сетям с использованием специальных модемов.

Рассмотрев базовые технологии электросвязи, займемся возможными способами их интеграции. Наиболее просто решаются задачи объединения двух услуг. Назовем это первым уровнем интеграции. Здесь с технической точки зрения проще интегрировать телефонию и передачу данных. В соответствии с диаграммой (рисунок В.2) возможны и развиваются 3 варианта:

1. Аналого-цифровая интеграция, когда канал тональной частоты (телефонный канал), используя ЧПК, объединяется с цифровым каналом передачи данных. Наиболее распространена технология ADSL.
2. Цифровая интеграция, в которой на принципах ВПК объединяются цифровые потоки телефонии и передачи данных - это технологии ISDN- BRI и PRI.
3. Интеграция на базе IP- протоколов, когда речь и данные передаются в виде пакетов.

Кроме этого реализуются и другие варианты интеграции 1 уровня. Наиболее распространена схема объединения сигналов аналогового кабельного телевидения и передачи данных (доступ в Интернет). Это не означает, что не появятся другие варианты интеграции 1 уровня, например, «Речь- Телевидение» в аналоговом, цифровом или комбинированном исполнении.

Если технологии первого уровня интеграции находятся на этапе массового внедрения, то полная интеграция (2 уровень) испытывает стадию экспериментальных исследований и опытного внедрения. В настоящее время наибольшую известность имеют технологии:



- АТМ - специально разработанная для полной интеграции, способная обеспечить разные уровни сервиса, высокие скорости передачи и другие достоинства цифровых технологий. Основным ее недостатком является высокая стоимость оборудования, что сдерживает широкое внедрение.
- IP MPLS - эволюционирует от услуг по передаче данных, постепенно включая в себе телефонию, а затем и телевидение. Такой подход является более рациональным и менее затратным, хотя по техническим характеристикам IP- технологии уступают АТМ. Более совершенным вариантом технологии IP MPLS является NGN (Next Generation Networks).
- Менее прогрессивным является способ интеграции 2 уровня на базе кабельного телевидения, так как в его основе пока лежат методы передачи аналоговых сигналов и ЧРК. В то же время сети кабельного телевидения хорошо развиты и не исключено, что на первом этапе они и будут основой для массовой услуги.

Все описанные выше тенденции развития телекоммуникаций активно реализуются в настоящее время с внедрением:

- волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и систем передачи, имеющих реальную пропускную способность при передаче цифровых сигналов в несколько сотен гигабит в секунду в одном волокне ;
- цифровых систем коммуникации и распределения трафика с использованием технологий коммутации каналов и коммутации пакетов. Число абонентских линий в цифровых коммутационных станциях достигает 200-300 тысяч;
- систем кабельного телевидения с числом кодовесных телевизионных программ до 100 и доступом в Интернет со скоростью до 40 Мбит/с;

- систем IP- телефонии с пакетной передачей речи в IP-сетях, в которых себестоимость услуги междугородной и международной телефонии снижается в несколько (3-5) раз без заметного ухудшения качества;
- сотовых систем связи и многих других достижений.

# 1. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ (ТС)

## 1.1 Каналы, тракты, системы и сети передачи информации

ТС предназначены для передачи информации. Для начала сформулируем некоторые определения:

**Информация** – совокупность сведений, данных, знаний о каких-либо процессах, явлениях, объектах и т.п., способных храниться, передаваться и преобразовываться для деятельности человека.

Носителем информации является сообщение, которое, в свою очередь, преобразуется в первичный электрический сигнал  $U(t)$ . Передача сообщения схематично представлена на рисунке 1.1, где  $S(t)$  – электрический сигнал, удобный для передачи по линии связи, а  $n(t)$  – помехи и шумы.

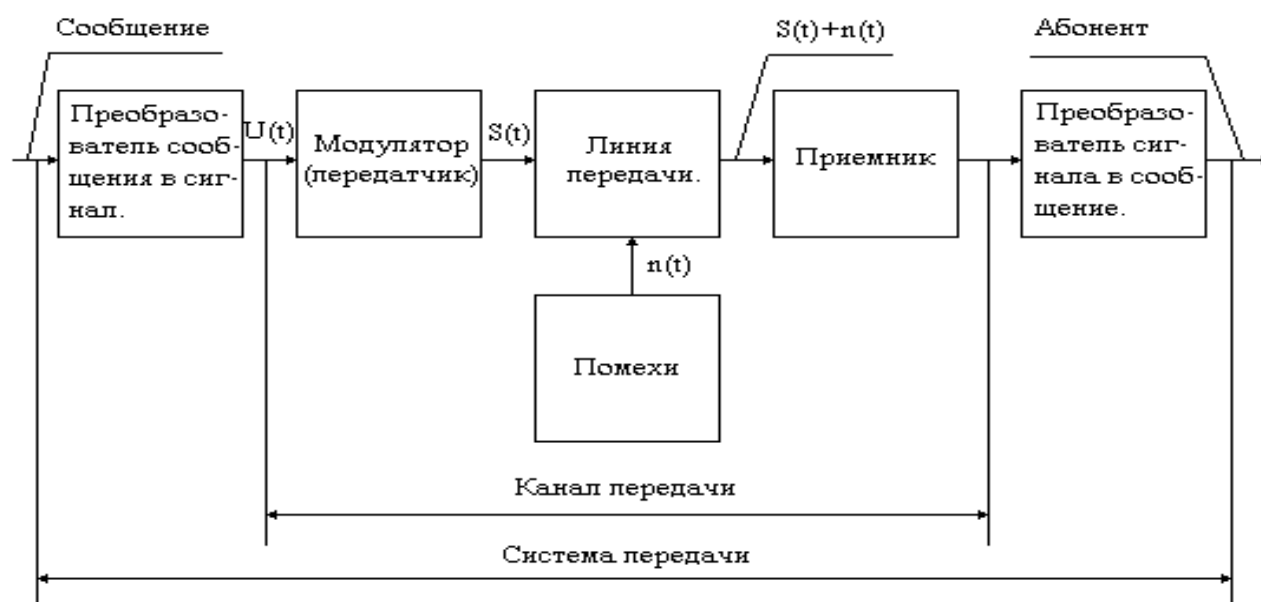


Рисунок 1.1 – Структурная схема системы передачи

**Линия передачи** – физическая среда распространения электромагнитных волн, несущих сообщение. После прохождения линии передачи сигнал испытывает обратное преобразование. В качестве линии передачи используются разные виды кабелей. На сегодняшний день одними из самых популярных являются витая пара и оптоволокно. Также довольно широко используются радиорелейные и спутниковые линии связи.

**Канал передачи** начинается и оканчивается у абонентов, но не включает в себя оконечные терминальные устройства.

**Система передачи** – канал передачи вместе с оконечными устройствами.

Рассмотренный канал передачи является двухточечным и односторонним, т.е. передача сообщений осуществляется в одну сторону.

Если источник и приемник поочередно меняются местами, то для обмена сигналами необходимо использовать двухсторонний канал связи, допускающий передачу как в одну, так и в другую сторону. Наиболее же эффективный способ передачи – это организация двух встречных каналов, работающих одновременно. Такой спаренный канал называется дуплексным.

Компромиссный вариант – полудуплексный режим: для достижения двухсторонней передачи используется один канал, два приемника и два передатчика, включаемые попеременно.

Обычно на практике используются многоканальные системы передачи (МСП). С их помощью мы можем передавать несколько сообщений одновременно по одному каналу. На рисунке 1.2 представлена обобщенная структурная схема МСП.

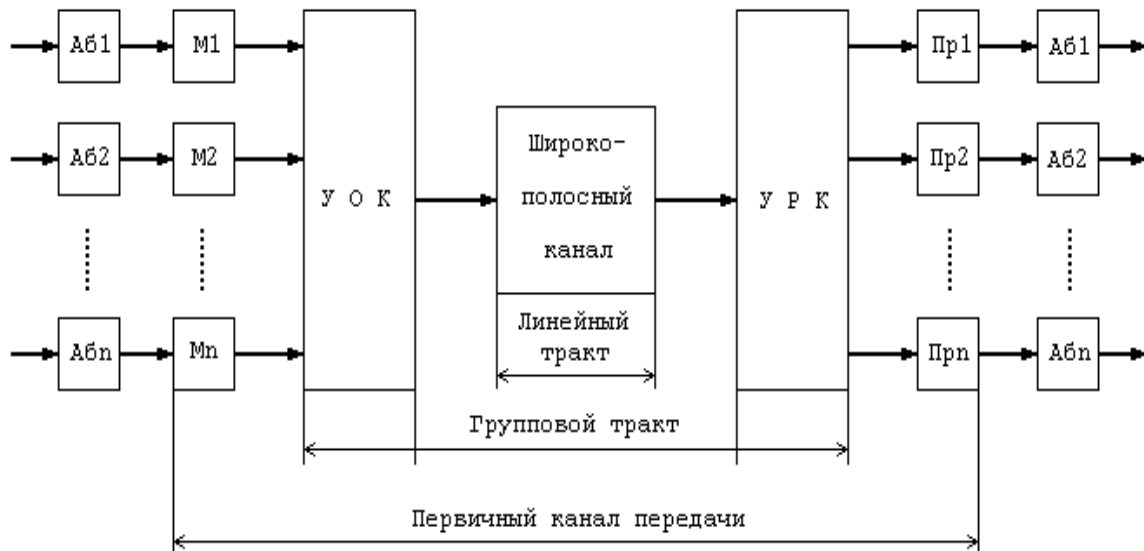


Рисунок 1.2 – Многоканальная система передачи:

Аб $_i$  – абонент; М $_i$  – преобразующие устройства (модуляторы);  
УОК – устройство объединения каналов; УРК – устройство разделения каналов; Пр $_i$  – преобразующие устройства (демодуляторы)

В МСП первичные сигналы, поступающие от абонента, преобразуются модуляторами ( $M_i$ ). Полученные сигналы называются канальными сигналами. УОК объединяет канальные сигналы в так называемый групповой сигнал.

В настоящее время в телекоммуникационных системах используют частотное разделение каналов (ЧРК), временное (ВРК) и кодовое (КРК).

При ЧРК каждому каналу соответствует своя полоса частот  $\Delta f_i$  (рисунок 1.3). Обычно все  $\Delta f_i$  равны, хотя может быть и не так. Все канальные сигналы в группе генерируются одновременно. Для того чтобы подчерк-

нать, что форма спектра канальных сигналов несимметрична и при объединении и разделении каналов спектр может быть инвертирован (зеркально отражен относительно  $f_i$ ), на рисунке 1.3 они изображены в виде «пилообразных треугольников». Роль преобразующих устройств в системе с ЧРК играют преобразователи частоты (смесители), а в качестве УОК применяется сумматор и передатчик (усилитель мощности). В качестве УРК используется система полосовых фильтров, настроенных на  $f_i$ . Выделенные канальные сигналы преобразуются в первичные с помощью детекторов.

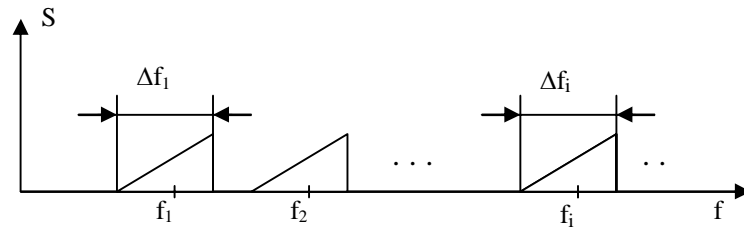


Рисунок 1.3 – Частотное разделение каналов

При ВРК из первичных сигналов делаются дискретные выборки с шагом дискретизации  $\tau_d$ . Моменты дискретизации для соседних первичных сигналов сдвинуты на время  $\tau_k$ . При этом за время  $\tau_d$  можно передать  $N = \tau_d / \tau_k$  дискретных сигналов (рисунок 1.4).

Здесь все сигналы группы передаются в одной полосе частот, но в разные моменты времени. Устройствами объединения и разделения каналов в этом случае будут соответственно мультиплексор и демультиплексор.

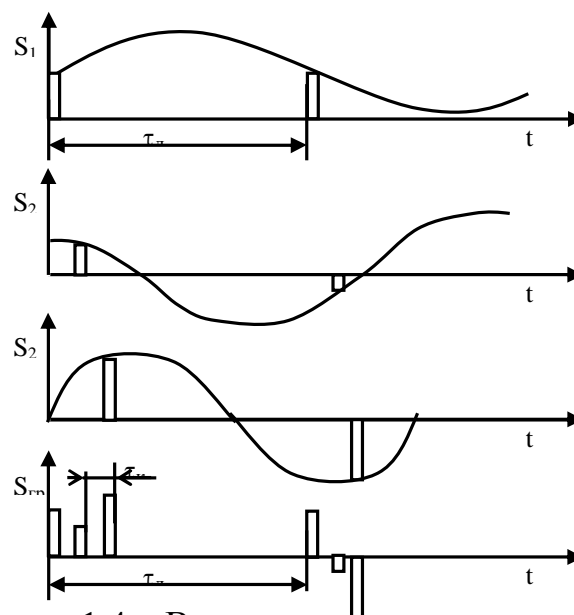


Рисунок 1.4 – Временное разделение каналов

При КРК все первичные сигналы преобразуются в цифровой код и символы этого кода передаются одновременно и в одной и той же полосе частот. Различение первичных сигналов осуществляется за счет внутренне-

го кодирования каждого символа (рисунок 1.5) с помощью специального кодера. На приемном конце каждому каналу соответствует свой коррелятор или согласованный фильтр.

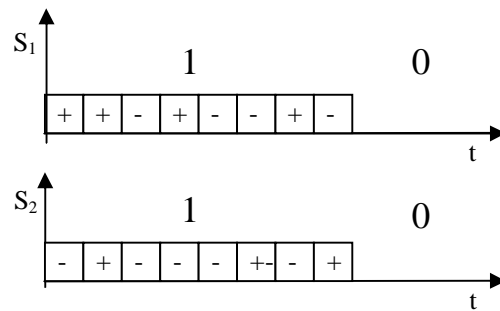


Рисунок 1.5 – Кодовое разделение каналов

Поскольку база такого сигнала  $B$  (число импульсов внутри символа) должна быть большой, порядка 100, то спектр сигнала при сохранении скорости передачи расширяется в  $B$  раз. Поэтому сигналы при КРК называют также широкополосными или шумоподобными.

Рассмотрим процедуру обмена данными между абонентами.

Информацию нужно не только передавать, но и распределять. Система, распределяющая информацию, называется сетью связи или сетью передачи информации.

На рисунке 1.6 показаны примеры сетей с постоянными соединениями (некоммутируемые сети). Все эти сети непригодны для большого числа пользователей, так как имеют следующие недостатки:

- связь во всей сети с общей шиной нарушается с обрывом «шинного» кабеля в любом месте;
- при соединении «звезда» слабым местом является центр коммутации;
- соединение «кольцо» трудно осуществить для большого числа узлов из-за трудностей с прокладкой кабеля;
- полносвязная сеть достаточно дорога, т.к. требует много межсоединений.

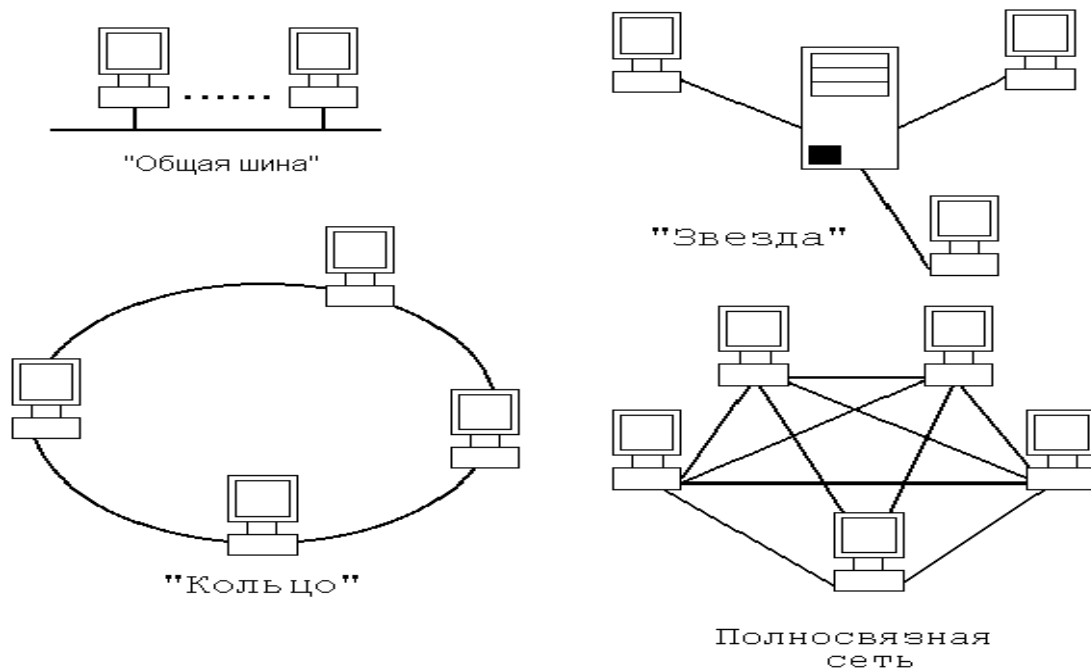


Рисунок 1.6 – Примеры некоммутируемых сетей

Поэтому обычно используют системы с временными соединениями (на время связи) через узлы коммутации. Узлы коммутации связаны соединительными линиями с высокой пропускной способностью (рисунок 1.7).

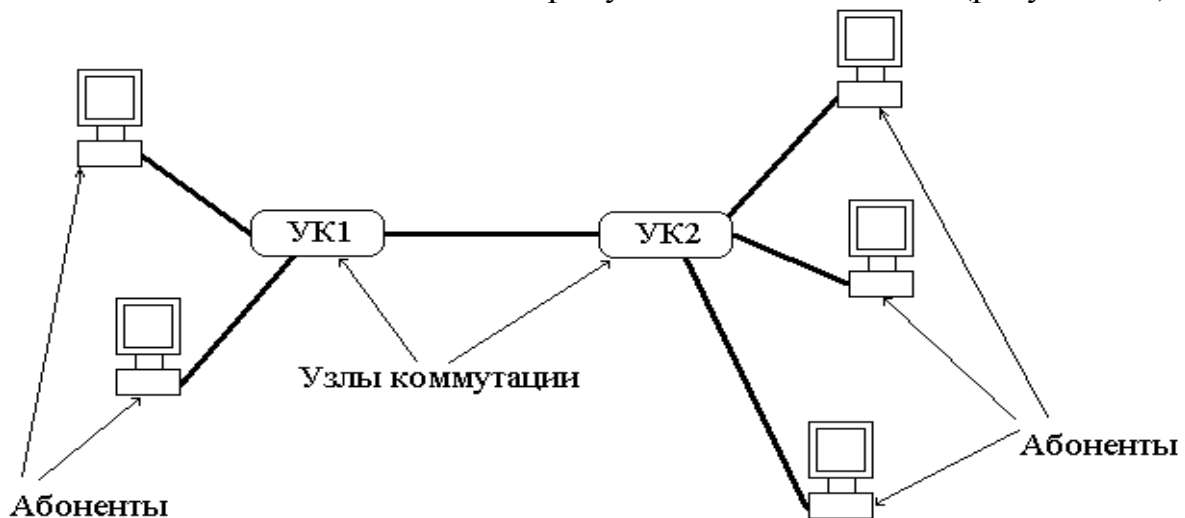


Рисунок 1.7 – Соединение через узлы коммутации

По запросу абонента некоторого УК методом переключения создают первичные каналы передачи между любыми абонентами каждого из узлов через соединительные линии.

Отличие такого соединения от группового тракта: в пределах группы передаваемых по соединительным линиям сообщений первичные каналы постоянно меняются.

## 1.2 Основные принципы построения телекоммуникационных сетей

Телекоммуникационные сети разделяются по следующим признакам:

### 1.2.1 Функциональные признаки

а) *Сеть передачи* (транспортная сеть, первичная сеть) – основа для оказания и распределения услуг. В сеть передачи входят:

- *системы передачи*;
- *сетевые узлы* – комплексы технических и программных средств, которые образуют долговременные (некоммутируемые) соединения групповых трактов и каналов;
- *сетевые станции* – сетевые узлы, в которых осуществляется распределение каналов и групповых трактов между вторичными сетями.

б) *Вторичные сети* – сети связи, коммутируемые и некоммутируемые, распределяющие информацию по службам и абонентам.

Эти сети существуют на основе транспортных сетей и отличаются друг от друга способом распределения.

Вторичные сети делятся на:

- телефонные;
- передачи данных;
- телерадиовещания и т.п.

Каждая вторичная сеть нацелена на конкретную услугу (конкретные виды сервиса). Но каждая служба и вторичная сеть могут предоставлять дополнительные услуги. Например, телефонная сеть – услуги Интернет, сеть передачи данных – услуги IP-телефонии.

в) *Служба электрической связи* – комплекс аппаратно-программных средств, предоставляющий услуги связи. Службы – системы связи третьего уровня. Они представлены на рисунке 1.8.

г) *Сети управления телекоммуникациями (TMN)* . Эти сети предназначены для решения следующих задач:

- управление конфигурацией сети, что предполагает непосредственный и удаленный доступ администраторов сети к формированию и развитию ее структуры, подключению и отключению региональных операторов и других пользователей и развитие услуг связи;
- управление неисправностями, предполагающее контроль состояния сети, обнаружение и локализацию неисправностей и их устранение, оповещение пользователей о проводимых работах;
- управление качеством связи;
- управление расчетами за услуги связи;
- управление безопасностью: защита от несанкционированного доступа в сеть на уровне баз данных и системы управления, соблюдение конфиденциальности при предоставлении данных.



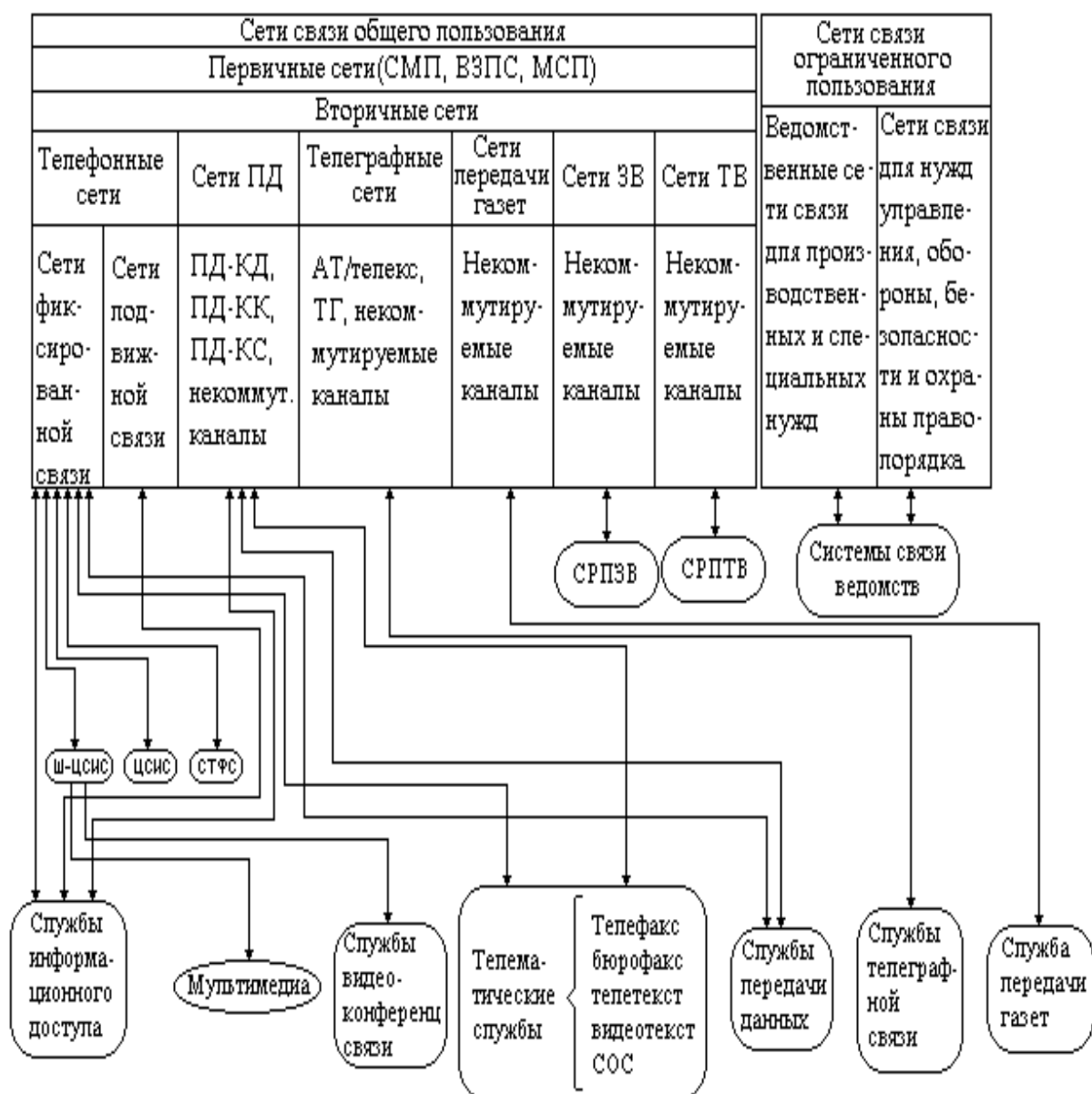


Рисунок 1.8 – Функциональная структура Взаимоувязанной сети связи Российской Федерации:

СМП – магистральная первичная сеть;

ВзПС – внутризоновая первичная сеть;

МСП – местная первичная сеть;

ПД-КК – передача данных – коммутация каналов;

ПД-КП – передача данных – коммутация пакетов;

ПД-КС – передача данных – коммутация сообщений;

АТ – абонентский телеграф;

ЦСИС – цифровые сети с интеграцией служб;

СТФС – система телефонной связи;

СРПЗВ – система распределения передач звукового вещания;

СРПТВ – система распределения передач телевизионного вещания;

СОС – система обработки сообщений.

TMN реализуются на базе существующих первичных и вторичных сетей в виде самостоятельной сети передачи данных (рисунок 1.9). Здесь оператор с помощью рабочей станции, операционных систем и сети передачи данных может управлять как системами передачи, так и коммутационным оборудованием (АТС).

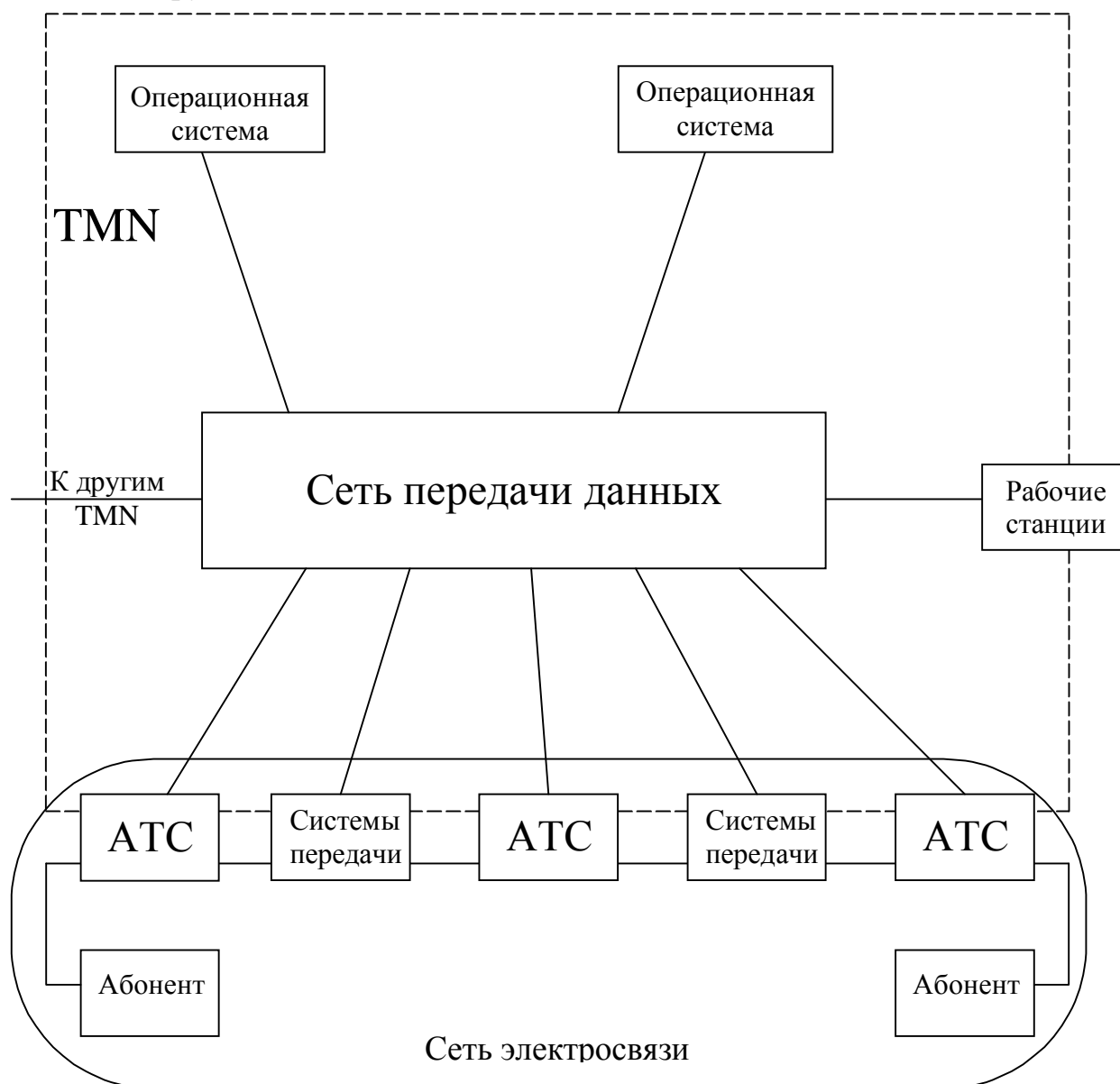


Рисунок 1.9 – Сеть TMN и ее взаимодействие с сетями электросвязи

### 1.2.2 Иерархические признаки (территориальные)

По степени охвата пользователей телекоммуникационные системы разделяются следующим образом:

**1.2.2.1** Глобальные – охватывают весь мир или значительную его часть. Примерами глобальных сетей являются всемирная телефонная сеть

общего пользования, сеть передачи данных Интернет, сотовая сеть стандарта GSM, спутниковые системы Инмарсат и др.

**1.2.2.2** Сети отдельных государств. Эти сети охватывают территории отдельных государств и включают в себя всю совокупность телекоммуникационных систем: транспортные и вторичные сети, сети доступа и службы электросвязи, сети управления связью. Примером такой сети является Взаимоувязанная Сеть Связи Российской Федерации (ВСС РФ). ВСС РФ представляет собой сложный комплекс связанных между собой региональных сетей связи общего пользования и ведомственных сетей с общим централизованным управлением. В ВСС РФ не входят частные сети, а также внутрипроизводственные и технологические сети различных организаций.

Основой ВСС РФ является первичная (транспортная сеть), которая состоит из магистральной сети, соединяющей сетевые магистральные узлы, а также зонавых и местных (городских и сельских) сетей.

**1.2.2.3** Зонавые первичные сети – это сети областного, краевого или республиканского значения. Они распределяют телекоммуникационные потоки из магистральной сети к сетям отдельных городов и сельских районов.

На рисунке 1.10 в качестве примера схематично показан участок магистрали Москва-Хабаровск. Сетевой магистральный узел находится в Новосибирске, сетевая станция – в г. Томске.

Выход городской сети города Томска к магистрали осуществляется через Междугороднюю Телефонную Станцию (МГТС). Соединение с магистралью осуществляется на сетевых узлах (СУ). Архитектура телефонной сети Томска имеет кольцевую структуру. Абоненты городской сети могут быть подключены непосредственно к одной из станций. А удаленные группы пользователей могут быть экономично включены в цифровую систему коммутации (ЦСК) с помощью выносных концентраторов, приближенных к месту группирования пользователей. Функционально концентраторы цифровой сети отличаются от аналоговых подстанций возможностью замыкать внутренние потоки информации без занятия коммутационного оборудования станций города и каналов, связывающих концентратор с ЦСК. Эти каналы используются только для внешней связи данной группы пользователей.

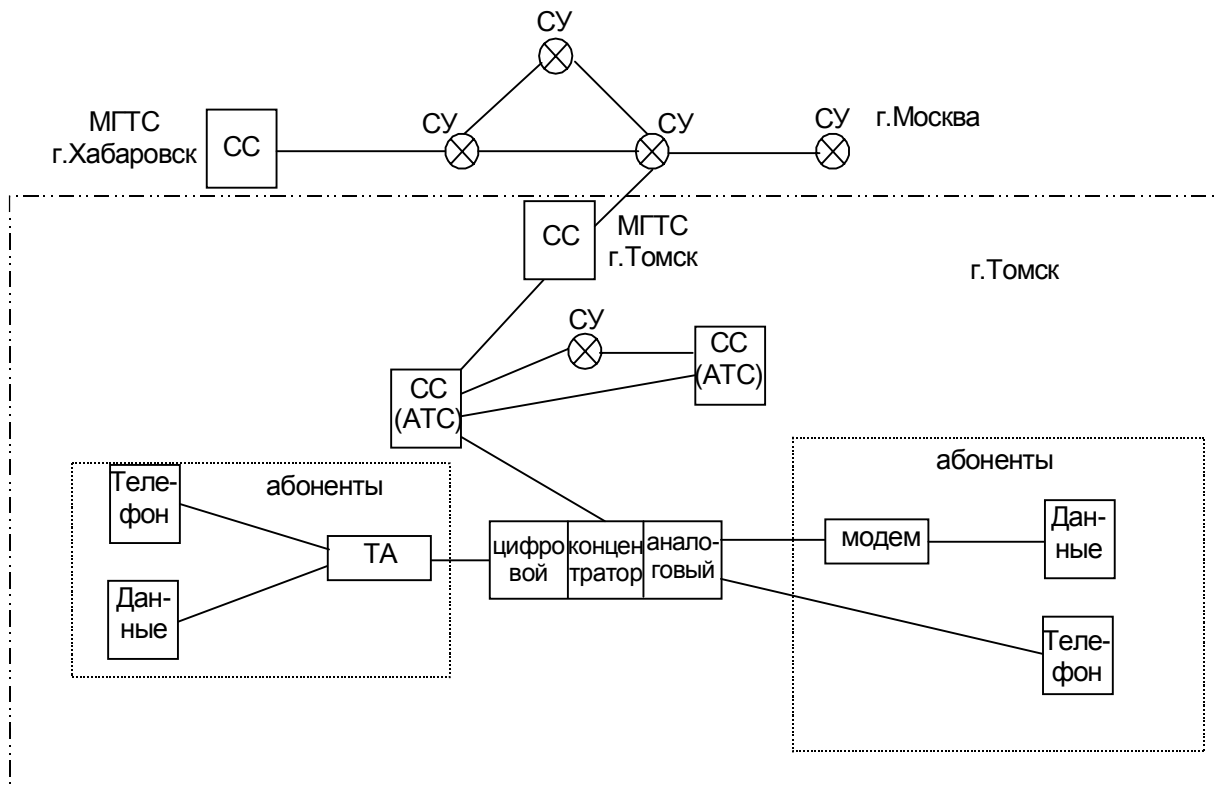


Рисунок 1.10 – Участок магистрали Москва-Хабаровск (схематично):  
ТА – терминальный адаптер

### 1.2.3 Стандартизация телекоммуникационных сетей и систем

Телекоммуникационные сети и системы являются сложными аппаратно-программными комплексами, распределенными на больших территориях и, как правило, состоящие из разнородных составляющих, т.е. включающие в себя оборудование и программное обеспечение различных производителей. Для успешного функционирования они должны быть состыкованы по своим входным и выходным параметрам, должны «понимать друг друга».

С этой целью разработано много стандартов как мирового, так и государственного уровня. В области телекоммуникаций и вычислительных сетей наиболее полный подход к разработке стандартов проявили две международные организации:

- Международная Организация по Стандартизации (МОС или ISO – International Standardization Organization);
- Международный Союз Электросвязи (МСЭ или ITU – International Telecommunication Union), ранее: Международный консультативный комитет по телефонии и телеграфии (МККТТ).

Эти и другие организации координируют свои усилия в области стандартов. Результатом этой координации явилась разработка эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС) (рис. 1.11), содержащей семь уровней или слоев.

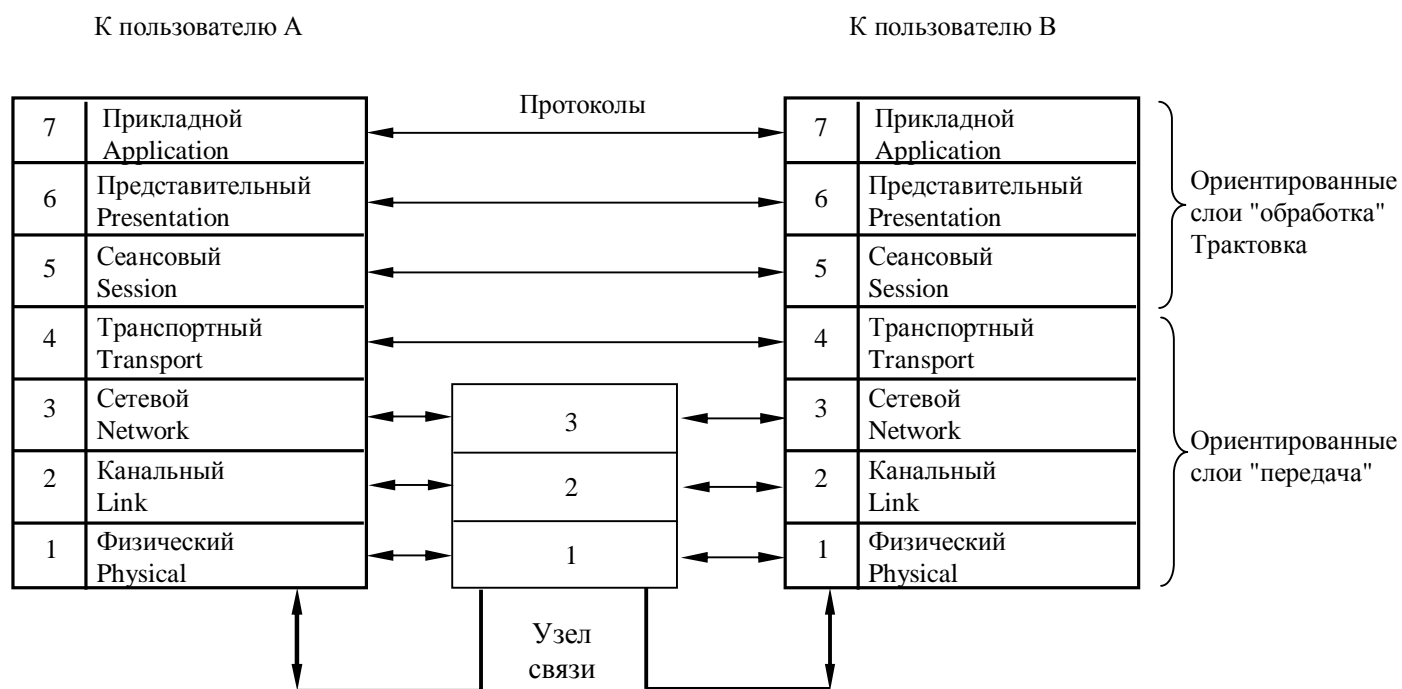


Рисунок 1.11– Эталонная модель ВОС:

- слои 1 и 2 обеспечивают одно единственное соединение;
- слой 3 избирает соединение (выбирает маршрут);
- слой 4 избирает пользователя;
- слои 5 – 7 относятся к пользователю и его прикладным процессам

В приведенной схеме учитывается, что компьютеры могут иметь различные операционные системы (например, РС и большая многотерминальная система). Следовательно, интерфейс между программой пользователя (прикладным процессом) и низлежащими службами связи может быть различным.

### Функции, выполняемые уровнями:

7	Прикладной	Интерфейс с прикладными программами. Передача, доступ и управление формами. Обмен сообщениями и документами (например, электронная почта). Передача и манипулирование задачами.
6	Представительный	Взаимная конверсия различных синтаксисов. Разработано несколько форм абстрактного синтаксиса данных для их использования совместно с синтаксисом передачи (конкретным синтаксисом) прикладными элементами. Формирование данных (коды, алфавит, графика).
5	Сеансовый	Организация и проведение сеансов взаимодейст-

		вия между прикладными процессами.
4	Транспортный	Сквозной через КС (коммуникационную систему) обмен данными между системами. Управление соединением, управление ошибками, фрагментация, управление потоком, сетевой сервис.
3	Сетевой	Сетевая маршрутизация, адресация, установление и освобождение вызовов. Обнаружение ошибок в физических средствах соединения. Сегментирование и объединение блоков данных.
2	Канальный	Установление и подтверждение соединений. Управление каналами (кадрирование, прозрачность данных). Управление ошибками в каналах (проверка четности или контрольных сумм).
1	Физический	Обеспечение физического и механического интерфейсов сети. Протоколы модуляции и линейного кодирования.

В качестве примера рассмотрим протокольный стек глобальной сети общего пользования стандарта TCP/IP (рисунок 1.12).

В стеке TCP/IP используются следующие протоколы:

- 1) Telnet – протокол эмуляции терминала;
- 2) FTP – протокол передачи файлов;

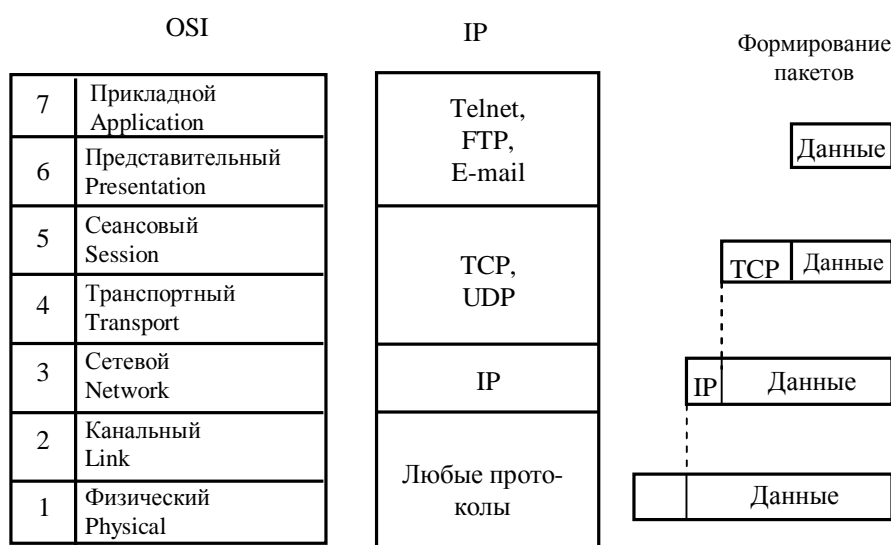


Рисунок 1.12 – Стек протоколов TCP/IP

3) TCP – протокол управления передачей, обеспечивает сервис надежной доставки информации;

4) UDP – пользовательский дейтаграмный протокол, обеспечивает негарантированную доставку пакетов без установления соединения между клиентами, но с большей скоростью, чем протокол TCP;

5) IP межсетевой протокол, обеспечивает доставку через узлы.

Как видим, в конкретном стеке протоколов функции некоторых уровней объединены и их число не равно 7. TCP/IP начинает работать только с третьего уровня. При переходе информации с уровня на уровень она снабжается дополнительным заголовком, несущим служебную информацию.

Покажем структуру заголовка IP – дейтаграммы (в битах):

Версия проток.4	Длина загол. 4	Тип сервиса 8	Общая длина дейтаграммы 16	
Идентификатор накл. 16			Флаг 3	Смещение фрагм. 13
Время жизни 8		Протокол уровня 8	верх.	Контрольная сумма 16
Адрес источника 32				
Адрес назначения 32				
Резерв				
Данные				

«Тип сервиса» включает в себя: приоритеты, задержку, пропускную способность, надежность. Длина пакета может изменяться (до  $2^{16}$ ), поэтому она указывается в поле «Общая длина» для облегчения обработки. «Идентификатор» – указывает номер пакета в группе. «Смещение пакета» – эта операция необходима при формировании из пакетов исходного сообщения. «Время жизни» необходимо для разгрузки коммутационного оборудования. Если пакет не дошел до адресата и «завис» в буфере узла коммутации, то по истечении времени, указанном в соответствующем поле кадра, он просто стирается.

Протокол верхнего уровня – TCP или UDP.

#### 1.2.4 Социально-экономические проблемы построения ТСС

Есть два подхода к построению систем:

1. Плановая (государственная) экономика.

Задаются требования к техническим параметрам и выходным характеристикам системы (состав, географическое расположение, информационные потоки), исходя из потребностей пользователей, географии, экономических и других условий и ограничений. Задача – построить такую систему. Финансирование осуществляет государство. Приоритеты – государственные, военные, производственные потребности.

## 2. Рыночная экономика.

Задаются критерии эффективности ТС и ограничения. Задача – построить ТС в наибольшей степени удовлетворяющей этим ограничениям. Финансирование – на коммерческой основе. Эксплуатация ТС здесь приносит прибыль. Приоритеты – платежеспособный спрос. В России сейчас происходит переход от плановой к рыночной экономике. Поэтому есть много проблем и главные из них:

- проблема инвестиций;
- проблема монополии (конкуренции).



## 2. СИГНАЛЫ И КАНАЛЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

### 2.1 Сигналы электросвязи

#### 2.1.1 Энергетические характеристики сигналов

К энергетическим характеристикам сигналов относятся абсолютные характеристики: мощность  $P$ , напряжение  $U$ , ток  $I$  и их уровни передачи (логарифмические характеристики)  $p_m$ ,  $p_u$ ,  $p_i$ . Для измерения мощности чаще всего используются уровни передачи по мощности, измеряемые в децибелах по мощности:

$$p_m = 10 \lg \frac{P}{P_0}, \quad (2.1)$$

где  $P_0$  – отсчетное значение  $P$ , начало отсчета.

Аналогично для напряжения и тока:

$$p_u = 20 \lg \frac{U}{U_0}. \quad (2.2)$$

Измерения мощности характеризуются:

- средним значением

$$P_{cp} = \frac{\bar{U}^2}{R} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \frac{U^2}{R} dt, \quad (2.3)$$

где  $R$  – сопротивление нагрузки,

$T$  – интервал усреднения;

- максимальным значением  $P_{max}$ . Поскольку электрический сигнал – это случайный сигнал, то для определения максимального значения вводится понятие  $P_{max}$  – мощность гармонического сигнала с амплитудой  $U_m$ , которая превышает мгновенное значение переменной составляющей исследуемого сигнала с определенной достаточно малой вероятностью  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = 10^{-2}, \dots, 10^{-5}$ );

- минимальной мощностью  $P_{min}$ . Чаще всего за  $P_{min}$  берут значение среднеквадратической ошибки при приеме сигнала. Эта величина определяется помехой, так что

$$P_{min} \approx P_{пом}. \quad (2.4)$$

Наряду с прямыми характеристиками мощности часто используют их производные:

- пик-фактор

$$\Pi = 10 \lg \frac{P_{\max}}{P_{\text{cp}}}; \quad (2.5)$$

- динамический диапазон

$$Д = 10 \lg \frac{P_{\max}}{P_{\min}}; \quad (2.6)$$

- защищенность сигнала

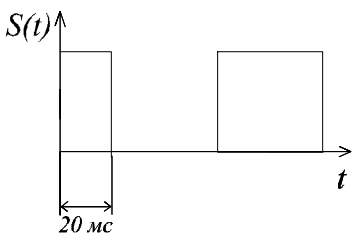
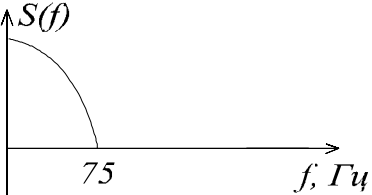
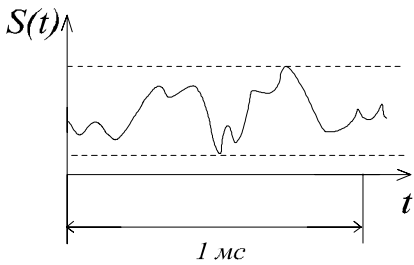
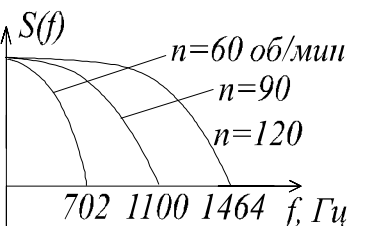
$$A_3 = 10 \lg \frac{P_{\text{cp}}}{P_{\min}}. \quad (2.7)$$

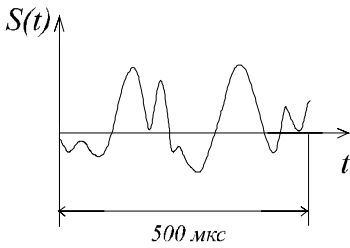
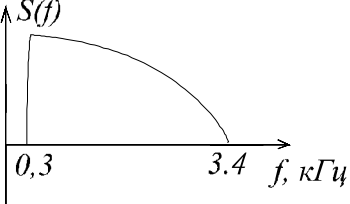
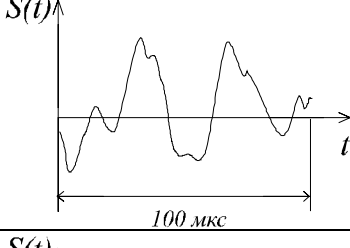
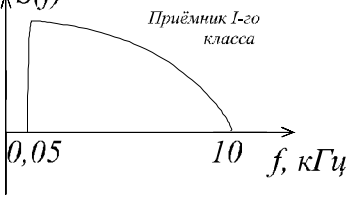
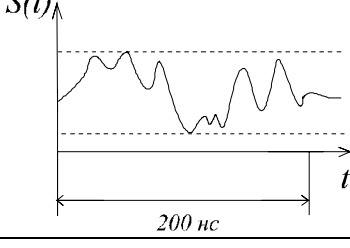
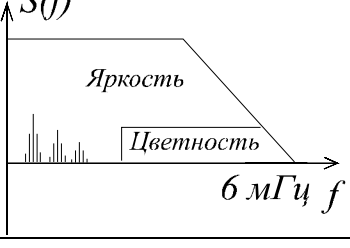
Защищенность  $A_3$  определяет уровень отношения сигнал-помеха.

### 2.1.2 Временные и спектральные характеристики первичных сигналов электросвязи

Временные и спектральные характеристики первичных сигналов электросвязи связаны с его формой. Для основных типов сигналов электросвязи они приведены в таблице 2.1

Таблица 2.1 – Временные и спектральные характеристики первичных сигналов электросвязи

Сигнал	Временная характеристика (форма сигнала)	Огибающая спектра
Телеграфный		
Факс		

Речевой (телефон)		
Продолжение табл.2.1		
Вещательный		
Телевизионный		

Часто вместо временных и спектральных характеристик используют параметры сигналов: длительность  $T_c$  и ширина спектра  $\Delta F_c$ .

### 2.1.3 Параметры сигнала с точки зрения его передачи по каналу связи

Основными параметрами аналогового сигнала с точки зрения его передачи по каналу связи являются:

- длительность сигнала  $T_c$ ;
- ширина спектра  $\Delta F_c$ ;
- динамический диапазон  $D_c$ .

Длительность сигнала  $T_c$  определяет интервал времени, в течение которого существует сигнал.

Ширина спектра  $\Delta F_c$  характеризует скорость изменения сигнала внутри интервала существования.

Для общей характеристики аналогового сигнала вводят физический «объем» сигнала  $V_c$ :

$$V_c = T_c \cdot \Delta F_c \cdot D_c.$$

Для описания канала связи также можно использовать три характеристики:

- время действия канала  $T_k$ ;
  - полосу пропускания канала  $\Delta F_k$ ;
  - динамический диапазон  $D_k$ , зависящий от чувствительности ( $P_{\min}$ ) и от максимальных нагрузок ( $P_{\max}$ );
- тогда емкость канала  $V_k$ .

$$V_k = T_k \cdot \Delta F_k \cdot D_k.$$

Необходимое условие передачи сигнала очевидно  $V_c < V_k$ . В простейшем случае

$$T_c < T_k, \Delta F_c < \Delta F_k, D_c < D_k.$$

Геометрическая интерпретация объектов информации сигнала и канала, и преобразование при модуляции даны на рис. 2.1.

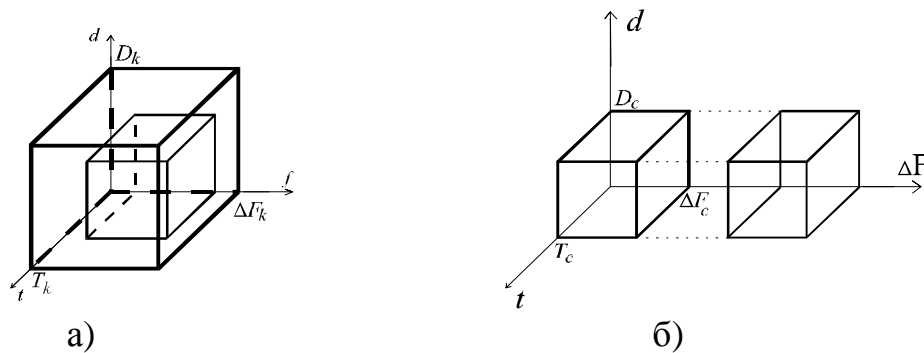


Рисунок 2.1 – Геометрические образы:

- а) согласование объемов сигнала и канала связи;
- б) преобразования основных характеристик сигнала

Для общей характеристики цифровых сигналов вместо физического «объема» применяют количество информации  $I_{\text{ц}}$ .

Цифровым сигналом называется дискретная во времени случайная комбинация двух и более (2, 4, 8, ...) разрешенных уровней  $l$ .

Дискретизация во времени осуществляется с тактовым интервалом  $T_T$  и соответственно с тактовой частотой

$$F_T = \frac{1}{T_T}.$$

Количество информации цифрового сигнала  $I_{\text{ц}}$  определяется следующим образом:

$$I_{\text{ц}} = F_T \cdot \log_2 l \quad (\text{бит}).$$

Здесь  $F_T$  – тактовая частота,  $l$  – число разрешенных уровней (например, 2 – «0» и «1»).

Чтобы оценить информационное содержание аналогового сигнала, следует учитывать два обстоятельства:

1. Тактовая частота в два раза больше максимальной частоты сигнала  $F_m$  (согласно теореме Котельникова):

$$F_T = 2 \cdot F_m.$$

2. Количество разрешенных уровней зависит от отношения средней мощности сигнала  $P_c$  к средней мощности шума  $P_{ш}$ .

$$l = \sqrt{1 + \frac{P_c}{P_{ш}}} = \sqrt{\frac{P_c + P_{ш}}{P_{ш}}}.$$

Тогда количество информации в аналоговом сигнале, условно преобразованном в цифровой, будет

$$I_A = 2 \cdot F_m \cdot \frac{1}{2} \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P_c}{P_{ш}} \right) = F_m \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P_c}{P_{ш}} \right).$$

#### 2.1.4 Сравнительная характеристика сигналов электросвязи

Сигнал	Полоса, Гц	Динамический диапазон, дБ	Количество информации, бит
Телеграф	75	—	75
Факс офисный	$f_{120} = 1465$ $f_{90} = 1100$ $f_{60} = 732$	25	11700 1464
Факс скоростной	$f_{рис} = 18 \cdot 10^4$	35	36000
Речь (телефон)	$f_{min} = 300$ $f_{max} = 3400$	35÷40	8000
Вещание	15÷20000 30÷15000 50÷10000	25÷60	160000
Телевизионный	$6 \cdot 10^6$	40	$80 \cdot 10^6$

## 2.2 Двусторонняя передача

### 2.2.1 Двусторонняя передача с 4-х проводным окончанием

Два встречных канала одностороннего действия образуют 4-х проводную линию (см. рисунок. 2.2). Здесь и далее размерность уровней в дБм0 означает, что абсолютное значение уровня на входе (выходе) отсчитано относительно точки нулевого относительного уровня (ТНОУ). Чаще всего в электросвязи в этой точке номинальное значение мощности равно 1 мВт.



Рисунок 2.2 – Четырехпроводная линия

В телефонии на соединительных линиях (между АТС) часто используется такая 4-х проводная линия.

### 2.2.2 Двусторонняя передача с 2-х проводным окончанием

Такой вид передачи является самым простым и дешевым. Он в массовом порядке используется в абонентских телефонных линиях. Передача сигнала осуществляется по паре проводов, которые протянуты от абонента до АТС. В такой линии передачи нет никаких активных однонаправленных устройств (усилителей). Поэтому в такой системе возможна передача сигналов в обоих направлениях. При этом разговор или передача данных должны вестись во времени поочередно.

Напротив, при передаче сигналов между АТС (особенно на междугородних линиях) необходимо применение отдельных каналов для двусторонней связи (см. предыдущий раздел)

В точке стыка (на АТС) двухпроводная и четырехпроводная линия должны быть согласованы.

В качестве примера можно рассмотреть канал тональной частоты (ТЧ) (см. рисунок 2.3), который согласует 2-х проводную линию (Абонент) и 4-х проводную линию (АТС).

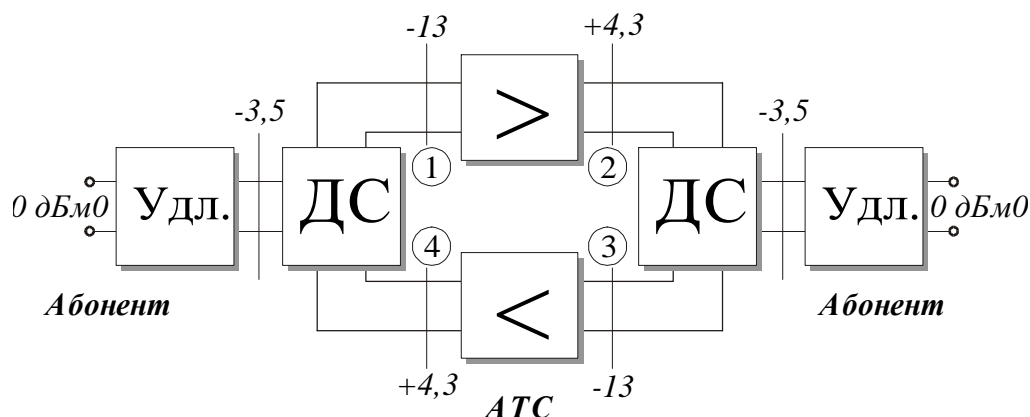


Рисунок 2.3 – Канал тональной частоты: Удл. – удлинитель;  
ДС – дифференциальная система; > – усилитель

В этой системе есть петля обратной связи, которая характеризуется  $\alpha_{OC} = -(\alpha_{12} + \alpha_{34}) + (\alpha_{41} + \alpha_{23})$  запасом устойчивости, где  $\alpha_{ij}$  – переходные затухания соответствующих участков. Рассмотрим эту величину:

$$\alpha_{OC} = 20 \cdot \lg \frac{\dot{U}_{ВЫХ}}{\dot{U}_{ВХ}} = 20 \cdot \lg \dot{K}_{OC}, \quad \dot{K}_{OC} = \frac{\dot{U}_{ВЫХ}}{\dot{U}_{ВХ}} = \frac{\dot{K}_O}{1 - \dot{K}_O \cdot \beta},$$

$$\dot{K} = |K(\omega)| \cdot e^{i \cdot \varphi(\omega)},$$

где  $\alpha_{OC}$  – постоянная составляющая затухания,  $\Delta\alpha_{OC}$  – переменная составляющая затухания ( $\Delta\alpha_{OC} \leq 0,6$  дБ).

На рисунке 2.4 изображена зависимость величины затухания от частоты. Из рисунка видно, что график имеет периодическую зависимость, которая объясняется прохождением частотных составляющих сигнала через усилители и дифференциальные системы с различными фазовыми сдвигами. В точках, где  $\alpha$  минимально, наиболее вероятна возможность паразитного самовозбуждения

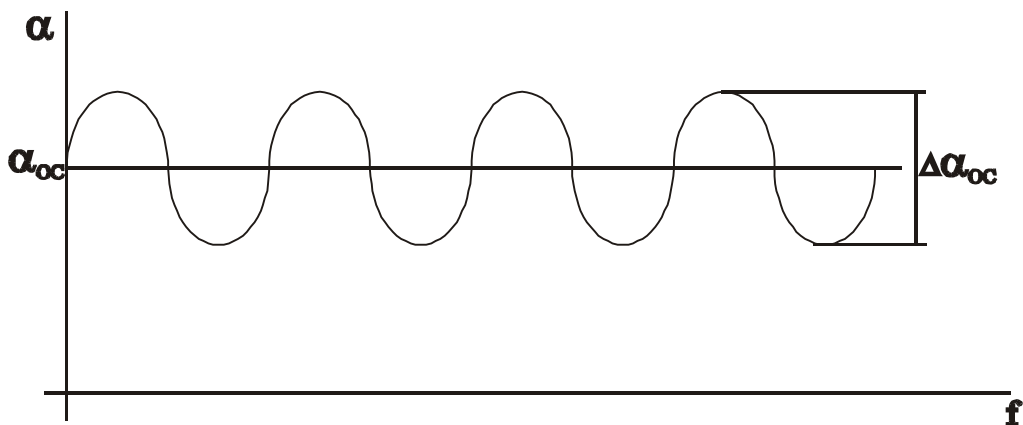


Рисунок 2.4 – Частотная зависимость затухания (согласование двухпроводного и четырехпроводного окончания)

В качестве развязывающих устройств в телефонных системах используют дифференциальные системы (рисунок 2.5).

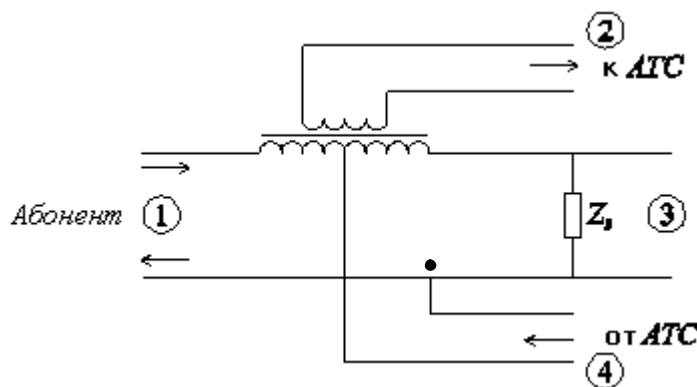


Рисунок 2.5 – Дифференциальная система

Рассмотрим эффект развязки при прохождении сигнала от АТС к абоненту. На первичной обмотке трансформатора относительно средней точки возникают напряжения противоположной полярности. Во вторичной обмотке эти напряжения наводят ЭДС разного знака, которые компенсируют друг друга. Сигнал к приемнику АТС не проходит. Для устранения отражения от выхода 3 его нагружают сопротивлением  $Z_3$ , согласованным с линией. Таким образом, входы 2 и 4 оказались развязанными. Аналогично доказывается развязка выходов 1 и 3. Удлинитель в канале ТЧ вместе с абонентской линией обеспечивает необходимое затухание – 3,5 дБ, которое нужно для подавления «эхо-сигналов» и эффектов обратной связи. Все дело в том, что абонентские линии, подключенные к дифсистеме, могут иметь существенный разброс по входному сопротивлению. При этом в контуре обратной связи за счет рассогласования возникают большие колебания  $\alpha$ . Для их сглаживания и служит удлинитель.

## 2.3 Каналы связи

Каналом передачи называется последовательное включение каналообразующего оборудования и линии связи. К каналообразующему оборудованию относятся модемы, передатчики и приемники, мультиплексоры и другие устройства. Различают аналоговые и цифровые каналы передачи по типу передаваемых сигналов.

Основные характеристики аналоговых сигналов точно такие же как и характеристики четырехполосников:

- входное сопротивление и коэффициент отражения;
- уровни сигналов на входе и выходе, остаточное затухание;
- частотная характеристика затухания, верхняя и нижняя частоты полосы пропускания;
- нелинейные искажения;
- помехозащищенность.

К важнейшим характеристикам цифровых каналов относятся:

- пропускная способность;
- помехозащищенность;
- полоса частот

Как правило в системах связи используются типовые каналы, в которых основные параметры и характеристики нормализованы.

Нормализованное число типовых каналов образуют групповые тракты, которые могут быть аналоговыми или цифровыми.

Рассмотрим далее основные типовые каналы и тракты.

### 2.3.1 Аналоговые типовые каналы

**1. Канал тональной частоты (ТЧ)** является основным в аналоговой телефонии. Он сосредоточен в частотном диапазоне 0,3 – 3,4 кГц. Входное и выходное сопротивления равны 600 Ом. Измерительные уровни КТЧ приведены на рисунке 2.3 во всех характерных точках. На входе канала максимальная мощ-



ность составляет 1 мВт (точка нулевого относительного уровня - ТНОУ). Для среднестатистического абонента пик-фактор телефонного сигнала  $\Pi = P_{max}/P_{cp}$  составляет 15-16 дБ. поэтому средняя мощность сигнала – 32 мкВт.

Уровень мощности помехи в ТНОУ по нормам для самого протяженного канала на должен превышать значения – 40 дБм, а защищенность канала  $A_3 = 25$  дБ.

Схема канала ТЧ изображена на рисунке 2.3.

*Общие сведения:*

- Диапазон частот  $\Delta f = 0.3 \div 3.4$  к.4 ;
- Затухание на краях полосы частот  $\Delta \alpha = 8,7$  дБ;
- Входное сопротивление  $R_0 = 600$  Ом.

*Помехи в канале ТЧ:*

- тепловой шум

уровень шума рассчитывается как

$$P_{ТШ} = k \cdot T \cdot \Delta f ,$$

где  $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{град}}$  – коэффициент Больцмана,  $T$  – температура,  $\Delta f$  –

полоса частот;

- дробовой шум (флуктуационный шум, возникает в активных элементах: усилителях и т.п.).

Коэффициент шума можно характеризовать как отношение мощностей сигнала и помехи на входе к их отношению на выходе:

$$N = \frac{P_{СВХ} / P_{ПВХСР}}{P_{СВЫХ} / P_{ПВЫХСР}} .$$

Он характеризует возрастание шума за счет активных элементов.

- межканальные помехи, возникают за счет электрических наводок (рисунк 2.6)

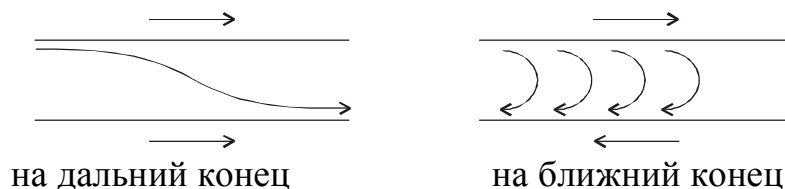


Рисунок 2.6 – Межканальные помехи

При появлении сигнала в одной паре проводов в другой за счет электромагнитной связи возникает сигнал наводки. Этот сигнал распространяется как в прямом (помеха на дальний конец), так и в обратном (помеха на ближний конец) направлениях.

**2. Аналоговые широкополосные каналы** Эти каналы реализуются методом ЧРК путем группирования КТЧ:

- 3 канала ТЧ,
- 12 каналов ТЧ,
- 60 каналов ТЧ,
- 300 каналов ТЧ.

Формирование этих каналов будет рассмотрено в разделе 3.

**3. Цифровые типовые каналы:**

- 64 кБит/с – основной цифровой канал,
- 2,048 Мбит/с – первичный канал (Е1),
- 8,448 Мбит/с – вторичный канал (Е2),
- 34,368 Мбит/с – троичный канал (Е3),
- 139,264 Мбит/с – четверичный канал (Е4),
- 155 Мбит/с – синхронный транспортный модуль STM-1,
- 622 Мбит/с – синхронный транспортный модуль STM-4 и т.д.

Их формирование рассматривается в разделе 4.

### 3. СИСТЕМЫ СВЯЗИ С ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ (ЧРК)

Особенностью этих систем является то, что все каналы работают одновременно, каждый в своем диапазоне частот (рисунок 1.3).

#### 3.1 Формирование канальных и групповых сигналов

Главное требование, применимое к системам ЧРК, заключается в минимизации ширины спектра при преобразовании сигнала. Для экономного использования частотного ресурса используют модуляцию с одной боковой полосой (ОБП) (см. рисунок 3.1).

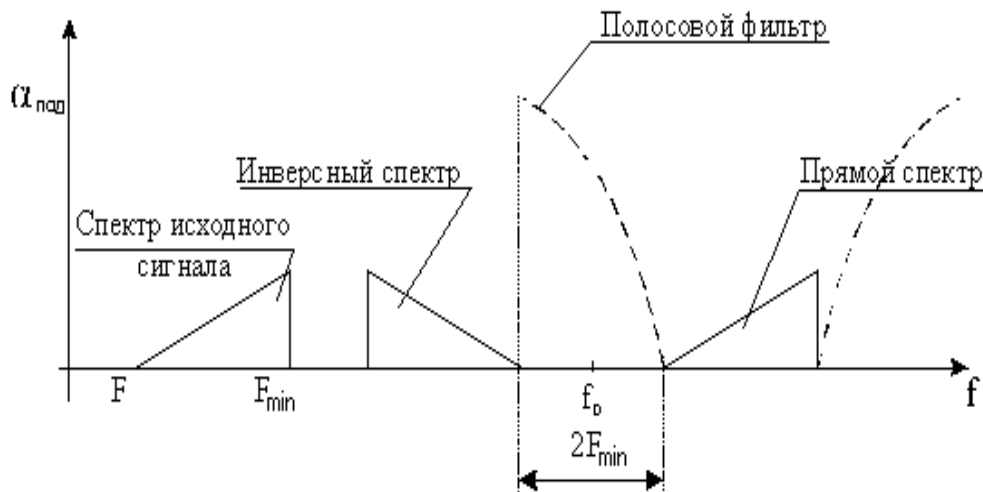


Рисунок 3.1 – Формирование сигнала с одной боковой полосой

Крутизна скатов полосового фильтра равна  $2F_{\text{MIN}}$ .

Величина подавления боковых составляющих спектра  $\alpha_{\text{ПОД}} = 65 \div 70$  дБ.

Эффективность фильтрации характеризуется полосой относительной расфилтровки  $\delta = \frac{2 \cdot F_{\text{MIN}}}{f_0}$ , которая предъявляет требования к параметрам фильтров:

- LC фильтры:  $\delta = 0.025 \div 0.03$ ;
- Кварцевые фильтры:  $\delta \leq 0.005$ .

*Рассмотрим кварцевый фильтр.*

При данных значениях для кварцевого фильтра, если

$\delta = 0.005$ ,  $2 \cdot F_{\text{MIN}} = 0.6$  кГц,  $\Delta f = 4$  кГц, то  $f_0 = 120$  кГц.

В полосе  $0 \div 120$  кГц можно было бы организовать 30 каналов, но при

учете условия «октавы»  $\frac{f_{\text{MAX}}}{f_{\text{MIN}}} = 2$  (минимум нелинейных искажений по 2-й

гармонике) получаем число каналов ТЧ равное 12, а частотный диапазон ~ 60 – 108 кГц. Эта совокупность каналов ТЧ составляет первичную группу.

**Способы формирования первичной группы:**

1. *Способ формирования первичной группы – с использованием кварцевых фильтров (с однократным преобразованием частоты).* Здесь и далее частоты даны в кГц.

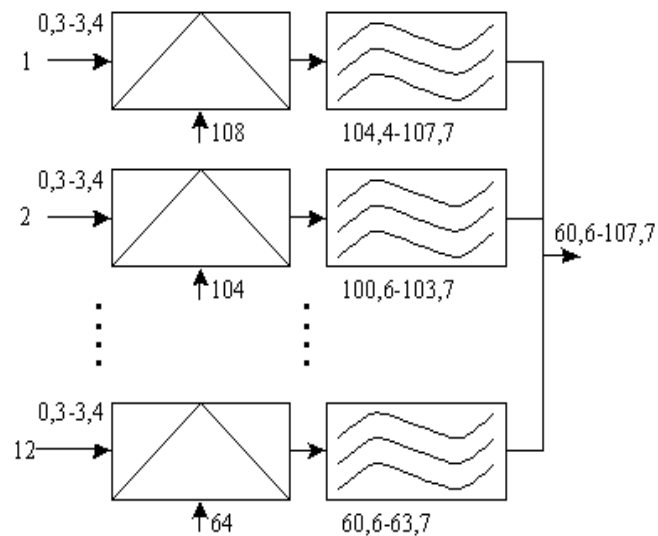
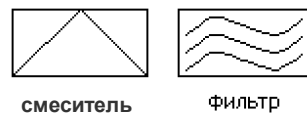


Рисунок 3.2 – Схема формирования первичной группы на кварцевых фильтрах. Условные обозначения:



Кратко рассмотрим принцип работы группообразующего устройства (рисунок 3.2). На вход смесителя подается исходный сигнал и сигнал несущей частоты. Затем сигнал, со смещенным на несущую частоту спектром, с выхода смесителя подается на полосовой фильтр. Образуется 12-ти канальная первичная, стандартная группа. Здесь требуется 12 различных кварцевых полосовых фильтров, что экономически не целесообразно.

Спектр сигнала на выходе изображен на рисунке 3.3.

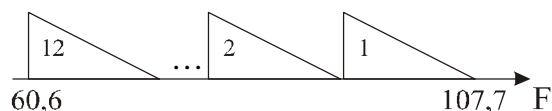


Рисунок 3.3 – Спектр сигнала на выходе

2. *Способ формирования первичной группы – с использованием LC фильтров (с двухкратным преобразованием частоты).*

Здесь формируются четыре подгруппы из трех каналов каждая и применяется второе преобразование частоты. Устройство формирования, изображенное на рисунке 3.4, имеет принцип работы, схожий с описанным выше.

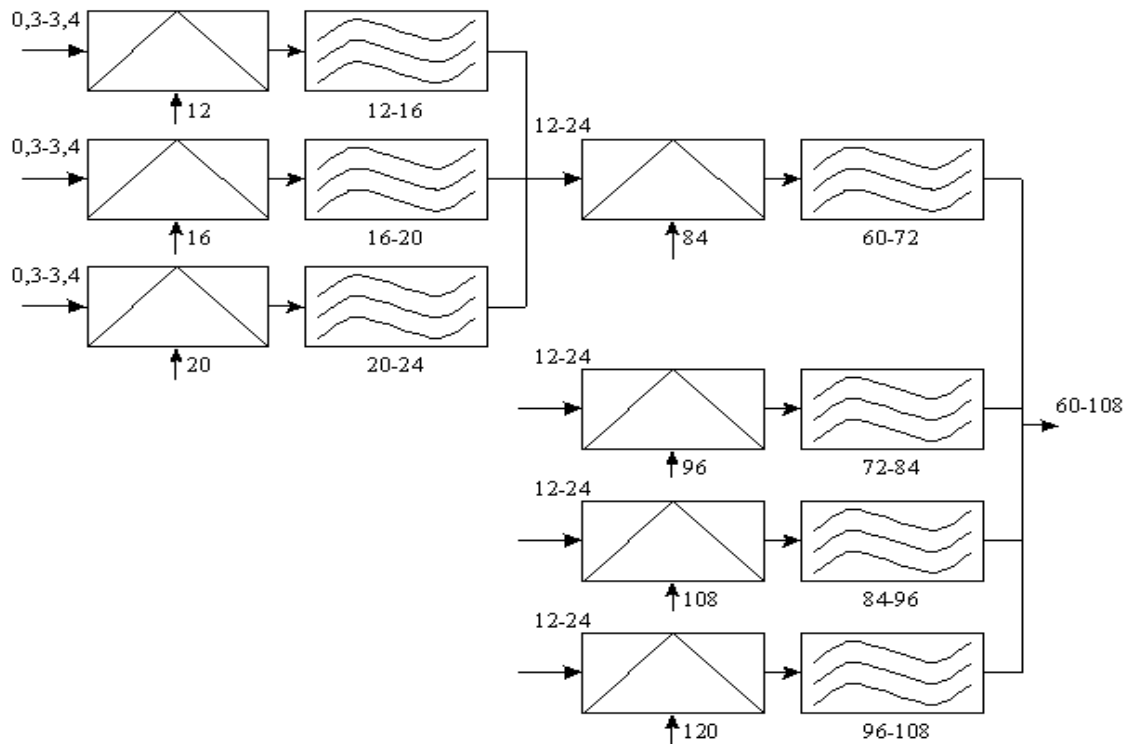


Рисунок 3.4 – Схема формирования первичной группы с LC фильтрами

На этих этапах

$$\delta_1 = \frac{2 \cdot F_{\text{MIN}}}{f_{01}} = \frac{0.6}{20} = 0.03 \text{ – первое преобразование частоты;}$$

$$\delta_2 = \frac{2 \cdot (f_{01} + F_{\text{MIN}})}{f_{01}} = \frac{2 \cdot (12 + 0.3)}{120} = 0.2 \text{ – второе преобразование}$$

частоты.

Условия для применения LC фильтров на 2 этапе еще лучше. В этом заключается главное достоинство этой схемы. Недостаток заключается в наличии дополнительных нелинейных искажений. На рисунке 3.5 изображены спектральные преобразования для этой схемы.

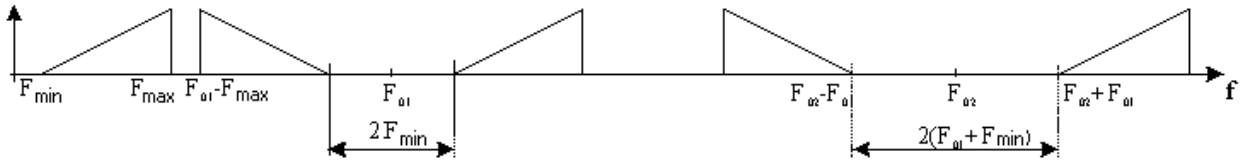


Рисунок 3.5 – Спектральные преобразования

3. Способ формирования первичной группы – с преобразованием частоты вверх.

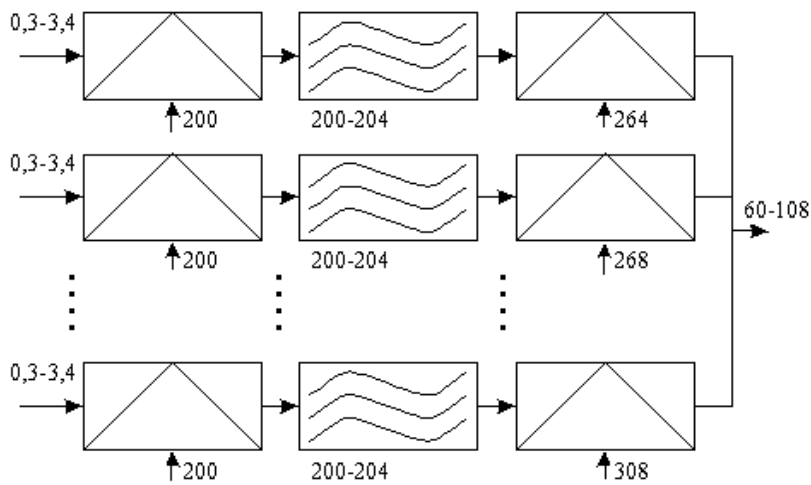


Рисунок 3.6 – Схема формирования первичной группы

Кратко рассмотрим принцип работы группообразующего устройства (рисунок 3.6). На входы смесителей подаются исходные сигналы и несущая частота, одинаковая для всех. Затем сигналы, со смещенными на несущую частоту спектрами, подаются на одинаковые полосовые фильтры. Образуется 12-ти канальная первичная стандартная группа. При втором преобразовании частоты сигналы смещаются вниз по частоте в требуемый частотный диапазон с помощью различных гетеродинов.

**Формирование вторичной группы:**

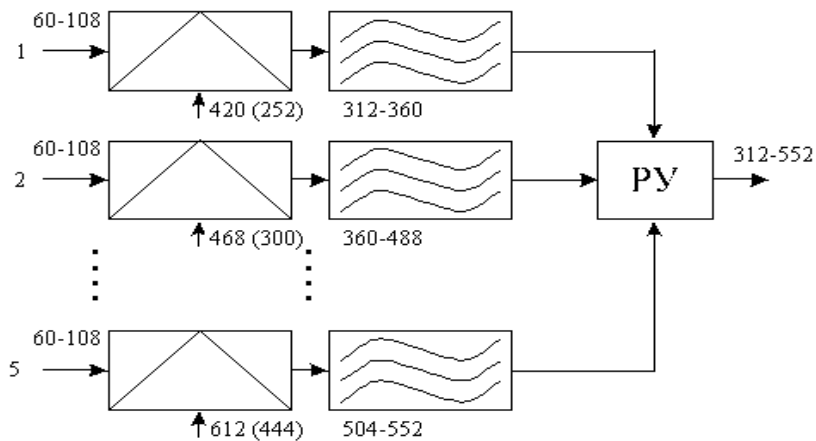


Рисунок 3.7– Формирование вторичной группы

Кратко рассмотрим принцип работы группообразующего устройства (рисунок 3.7, где РУ – развязывающее устройство). На вход смесителя подается исходный групповой сигнал и несущая частота. Затем сигнал, со смещенным на несущую частоту спектром, с выхода гетеродина подается на полосовой LC-фильтр. Образуется 5-ти канальная вторичная стандартная группа (312–552 кГц).

#### **Формирование третичной группы:**

Третичная группа (812–2044 кГц) формируется путем преобразования 5 вторичных групп. Применяются LC фильтры и гетеродины (1364, 1512, 1860, 2108, 2356 кГц).

#### **Формирование четверичной группы:**

Четверичная группа (8516 – 12388 кГц) создается из 3 третичных групп с помощью LC фильтров и гетеродинов (10560, 11880, 13200 кГц).

### **3.2 Организация линейных трактов**

#### **3.2.1 Выбор числа каналов**

Выбор числа каналов в многоканальных системах определяется характером услуги (телефония, телевидение, передача данных и др.), а также верхней  $f_в$  и нижней  $f_н$  частотами полосы пропускания. При организации линейных трактов используют кабели: симметричные и коаксиальные электрические и оптоволоконные.

- в симметричных кабелях частота  $f_в$  ограничивается взаимным влиянием пар в многопарном кабеле, и это влияние возрастает с частотой вследствие наводок  $f_в \leq 5\lambda/\Delta$ . Частота  $f_н$  определяется спадом частотной характеристики кабеля на нижних частотах  $f_н \geq 6\text{ кГц}$ ;

- в коаксиальных кабелях  $f_н$  ограничивается недостаточным экранированием внешней оплетки и вследствие этого дополнительным затуханием и

влиянием внешних помех  $f_n \geq 60 \text{ кГц}$ . Частота  $f_c$  определяется затуханием в кабеле вследствие омических потерь и потерь в диэлектрике  $f_b \leq 60 \text{ МГц}$ .

### 3.2.2 Методы организации двусторонних трактов

Существуют три основных метода организации двусторонних трактов:

1. Система четырехпроводной однополосной связи (рисунок 3.8).

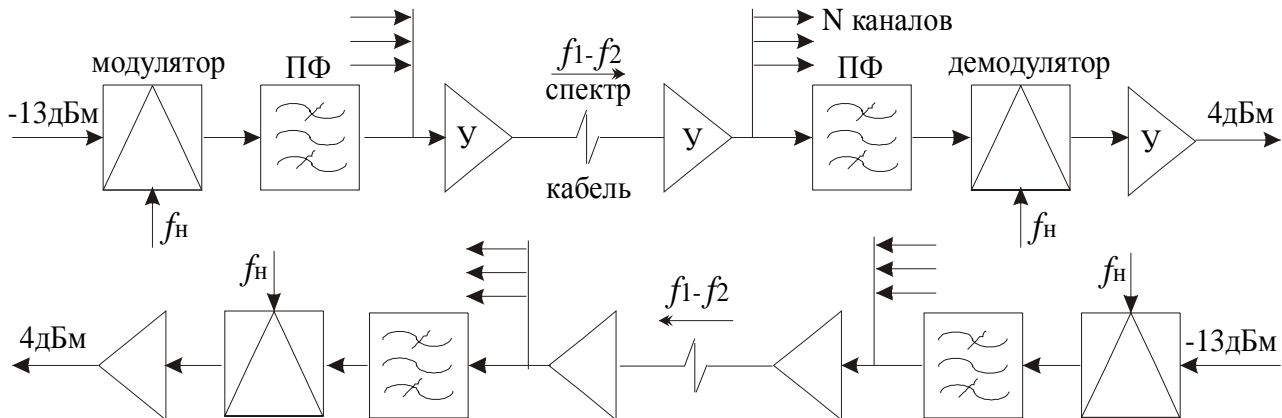


Рисунок. 3.8 – Система четырехпроводной однополосной связи

Для передачи в каждом из направлений используют самостоятельную двухпроводную цепь с необходимым числом односторонних промежуточных усилителей. В этом случае сигналы встречных направлений могут занимать в каждой из цепей один и тот же диапазон частот, и поэтому требуется меньшая полоса частот. Можно сказать, что в каждом случае сигналы противоположных направлений передаются (локализуются) в различных областях пространства, то есть здесь применяется *пространственное разделение* направлений передачи. Такая система двусторонней связи называется *четырёхпроводной однополосной* и применяется преимущественно в кабельных линиях и является самой распространенной.

Вход и выход канала должны быть симметричными; номинальное значение входного и выходного сопротивлений 600 Ом; нормированное (номинальное) значение абсолютного измерительного уровня на входе канала  $p_{вх} = -13 \text{ дБм}$ , а на выходе  $p_{вых} = +4 \text{ дБм}$ .

В этой системе использован *метод частотного разделения каналов*. В качестве переносчиков выбирают гармонические несущие колебания с различными частотами:  $f_{н1}, f_{н2} \dots f_{нN}$ . В результате каждый первичный сигнал после преобразования в каналный, то есть после модуляции и фильтрации в полосовом фильтре (ПФ), будет размещаться в своей полосе частот. Далее сигналы смешиваются в один групповой сигнал (с суммарным спектром  $f_1 \div f_2$ ), который усиливается в усилителе (У) и передается в линию передачи (кабель). При приеме групповой сигнал усиливается. Далее происходит выде-



ление из группового сигнала канальных с помощью ПФ, настроенных на соответствующие полосы частот. Первичные сигналы восстанавливаются демодуляторами из канальных. Аналогичные процессы происходят и по обратному каналу.

## 2. Система двухпроводной однополосной связи.

Передача встречных сигналов по различным физическим цепям не всегда возможна и экономически оправдана. Так, при использовании радиолиний такое пространственное разделение направлений передачи связано с серьезными техническими трудностями и требует больших капиталовложений. Поэтому во многих случаях в системе двухсторонней связи используют одну двухпроводную цепь.

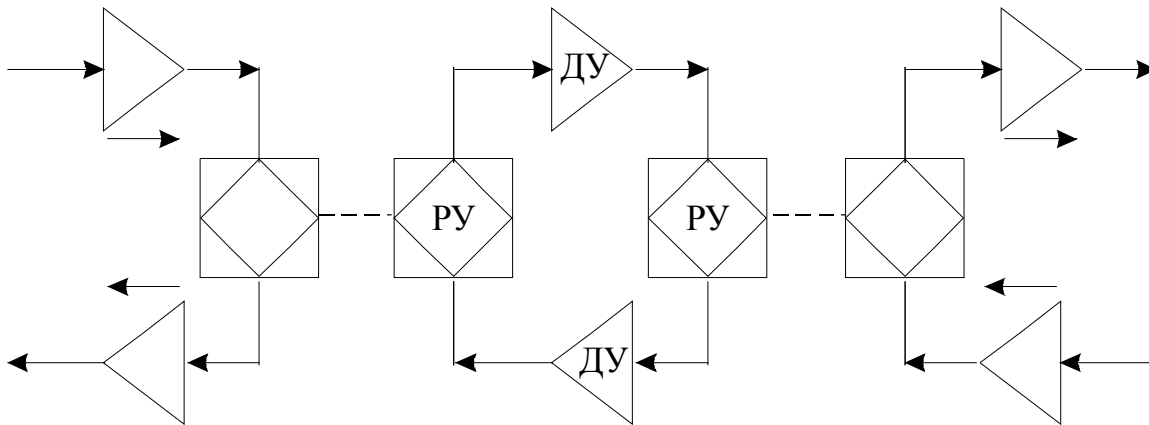


Рисунок. 3.9 – Система двухпроводной однополосной связи

Примером такой цепи может служить система *двухпроводной однополосной* связи (рисунок 3.9). Передача сигналов в обоих направлениях осуществляется в одном и том же диапазоне частот. Задача двухстороннего усиления решается при этом с помощью так называемых *дуплексных усилителей (ДУ) с развязывающими устройствами (РУ)* типа уравновешенного моста. Обычно применяют РУ с дифференциальными трансформаторами. Поскольку практически невозможно добиться точного соответствия входных сопротивлений участка цепи и балансного контура, в дуплексных усилителях не удастся получить хорошую развязку усилительных элементов встречных направлений передачи. Поэтому приходится ограничивать их усиление. Балансировку РУ выполнить тем труднее, чем шире полоса частот передаваемых сигналов. При включении в тракт нескольких дуплексных усилителей создается большое количество путей для токов обратной связи, в результате чего возможно возникновение самовозбуждения. Поэтому число включаемых в тракт дуплексных усилителей не превышает шести. Указанные недостатки *двухпроводной однополосной системы* ограничивают области ее применения; в аналоговых систе-

мах передачи она обычно используется для организации связи на небольших расстояниях и применяется в одноканальных системах.

### 3. Система двухпроводной двухполосной связи.

Во многих случаях в системе двухсторонней связи используют одну двухпроводную цепь, а передача сигналов в противоположных направлениях производится в неперекрывающихся диапазонах частот. В этой системе использован *метод частотного разделения каналов*. Передача группового сигнала в одну сторону происходит в области низких частот, а в другую в области высоких. Развязка этих сигналов при приеме и передаче, а также усилителей встречных направлений передачи обеспечивается *фильтрами низкой и высокой частоты* соответственно (ФНЧ и ФВЧ) (рисунок 3.10).

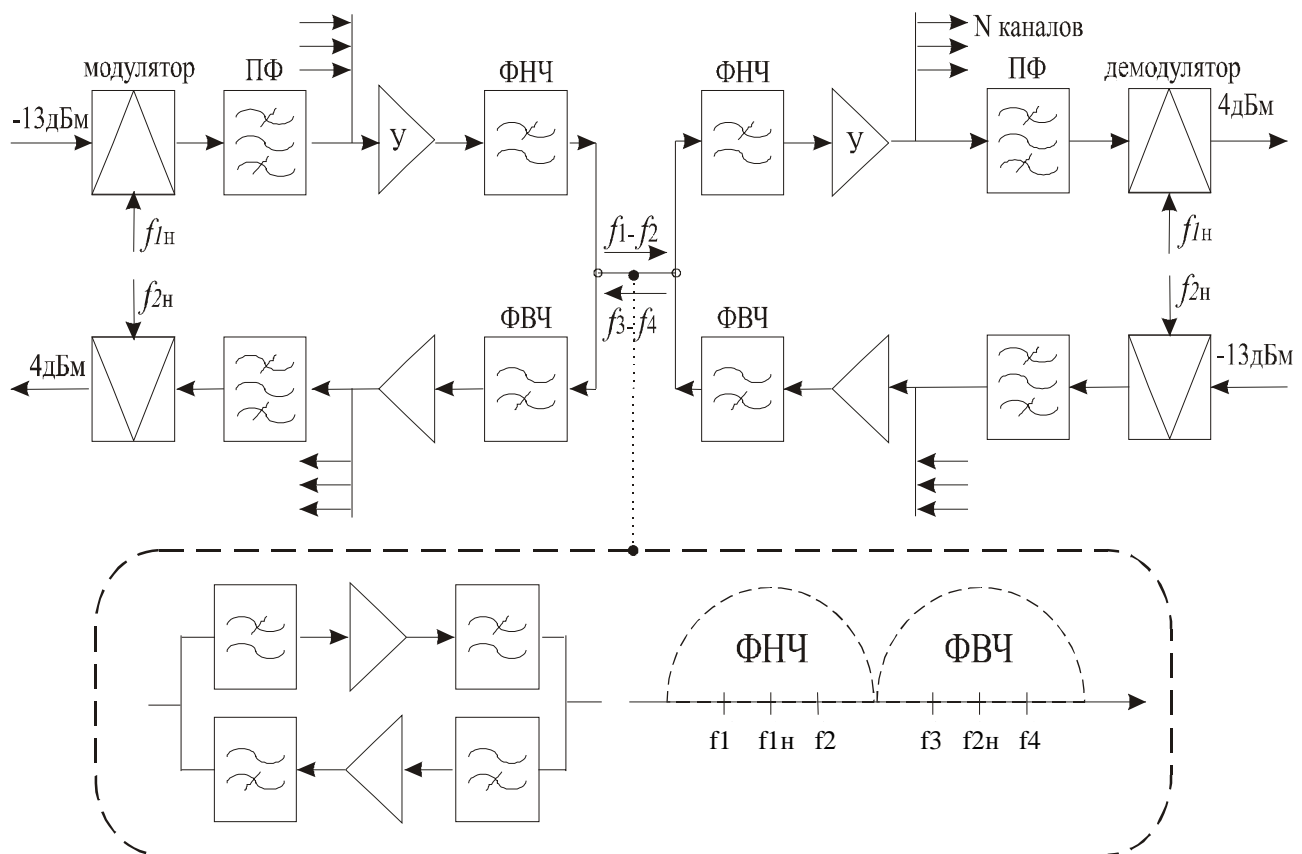


Рисунок. 3.10 – Система двухпроводной двухполосной связи

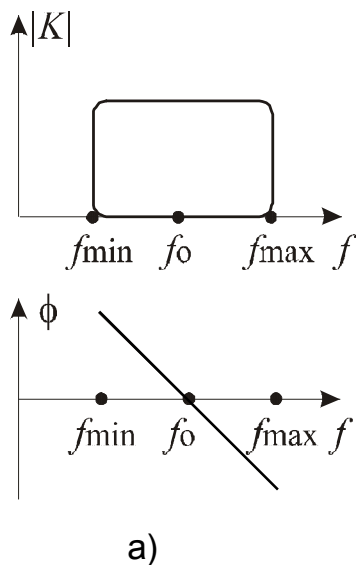
Такая система связи называется *двухпроводной двухполосной*. Она применяется на воздушных, иногда на кабельных (например, на подводных), а также на радиорелейных линиях связи.

### 3.3 Коррекция линейных искажений

Вся система ЧРК нуждается в коррекции, так как в реальном линейном тракте присутствуют *частотные искажения*, которые появляются из-за неравномерности АЧХ и ФЧХ.

На рисунке 3.11, а показаны АЧХ и ФЧХ идеального тракта. Реально же в тракте (рисунок 3.11, б) происходит затухание сигнала, зависящее от частоты. Чтобы это преодолеть, нужно затухание  $\alpha$  компенсировать усилением  $K$  с такой же частотной зависимостью. Эта процедура называется частотной коррекцией.

В идеальном тракте.



В реальном тракте.

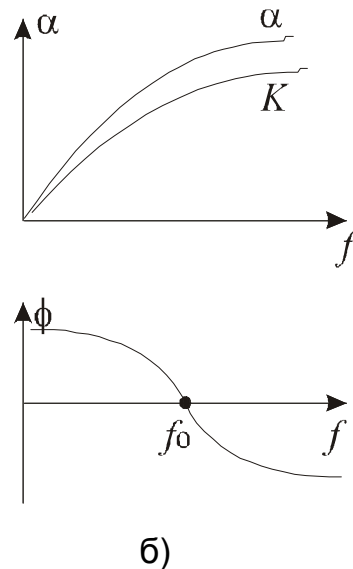


Рисунок. 3.11 – Частотные характеристики: а) идеального тракта; б) реального тракта

Существуют следующие виды искажений частотных характеристик:

- основные (заранее известные отклонения АЧХ и ФЧХ от идеальных);
- регулярные (возникают из-за неидеальности коррекции, и они накапливаются от участка к участку);
- случайные – возникают непредсказуемо, из-за неоднородности участков линий связи (волновое сопротивление), из-за изменения параметров аппаратуры (старение, изменение температуры) и изменения параметров кабельных линий (изменение температуры и влажности).

Для компенсации искажений существуют следующие виды корректоров:

- постоянный корректор (его параметры не меняются);
- переменный корректор (регулирует оставшиеся частотные искажения).

Переменный корректор бывает трех видов (по типу компенсации):

1. Плоский регулятор (РП).
2. Наклонный регулятор (РН).

### 3. Криволинейный регулятор (РК).

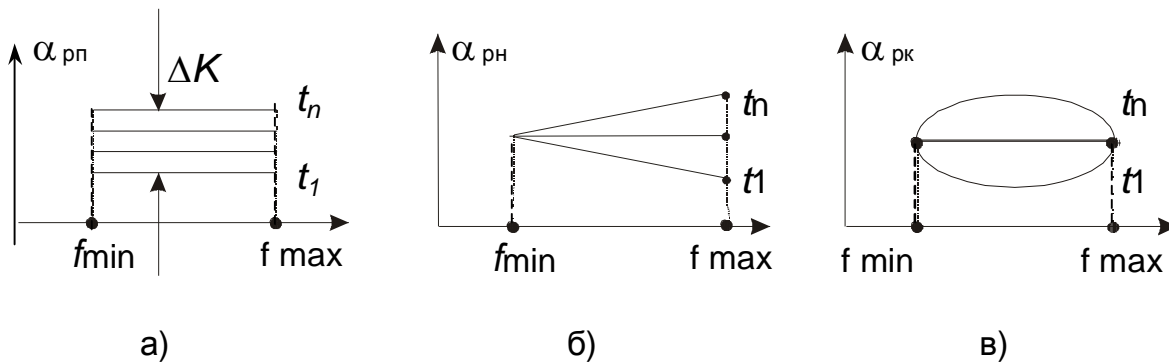


Рисунок 3.12 – Характеристики корректоров:

- а) плоский регулятор;
- б) наклонный регулятор;
- в) криволинейный регулятор;
- $t_n$  – параметр (температура и т.п.)

На рисунке 3.12 показаны характеристики корректоров. В зависимости от уровня сигнала в канале РП вносит дополнительное затухание (постоянное по всей полосе частот). РН вносит дополнительное затухание, линейно зависящее от частоты. РК компенсирует нелинейные искажения частотной зависимости затухания.

Теперь рассмотрим место включения корректора:

1. На выходе усилителя. Недостаток этого метода – падение мощности сигнала за счет затухания в корректоре. Для компенсации этого падения необходимо увеличивать коэффициент усиления  $K$  и мощность источника питания.

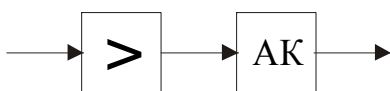


Рисунок 3.13 – Корректор на выходе усилителя

2. На входе усилителя. Недостаток этого метода – защищенность сигнала хуже, поскольку входной сигнал ослабляется корректором, а собственные шумы усилителя остаются неизменными.

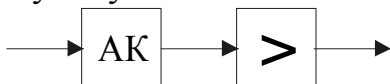


Рисунок 3.14 – Корректор на входе усилителя

3. В цепи отрицательной обратной связи. Здесь недостатки первых двух методов устраняются, но в системе возможно самовозбуждение. Дело в том, что разность затухания в тракте на частотах  $f_{\min, \max}$  может достигать 60 Дб. Такую же частотную неравномерность должен иметь и корректор (рисунок 3.15).

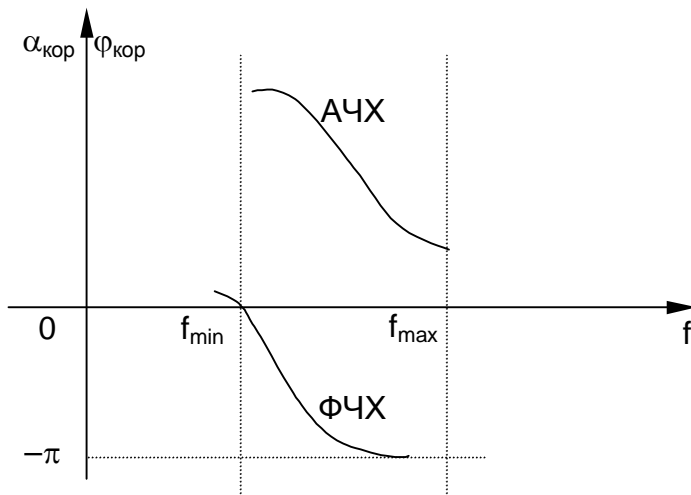


Рисунок 3.15 – Амплитудная и фазовая неравномерности корректора

Увеличение амплитудной неравномерности вызывает значительную фазочастотную неравномерность. Разность фаз на границах частотного диапазона может достигать  $180^\circ$ . Поэтому отрицательная обратная связь, необходимая для устойчивой работы корректора, может превратиться в положительную. Поэтому корректоры с обратной связью с запасом по устойчивости компенсируют амплитудно-частотные искажения с перепадами не более 25–30 Дб.

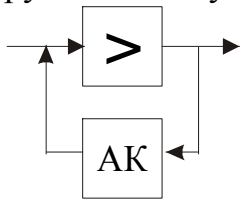


Рисунок 3.16 – Корректор в цепи ОС

4. Комбинированный метод с двумя корректорами (недостатков меньше и защищенность сигнала лучше, чем во втором способе). Этот метод является самым распространенным на практике.

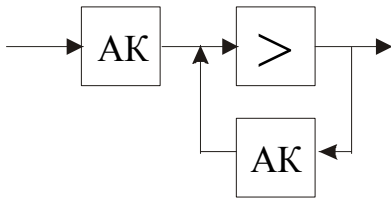


Рисунок 3.17 – Комбинированный метод с двумя корректорами

5. Комбинированный метод с повторным усилением (требует большего числа усилителей и поэтому используется редко).

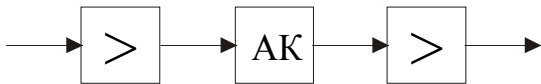


Рисунок 3.18 – Комбинированный метод с повторным усилением

### 3.4 Помехи в аналоговых системах передачи

Помехи – это мешающие приему информации электрические колебания, связанные с внешними или внутренними причинами.

#### 3.4.1 Классификация помех

##### 1. По месту возникновения:

- Внутренние помехи (возникают в узлах аппаратуры и линиях передачи):

- собственные помехи (тепловой и дробовой шум);
- помехи нелинейного происхождения (комбинационные частоты  $f_1 \pm f_2 \pm f_3$ , возникающие в выходных каскадах передатчиков, преобразователях частоты, детекторах и т.п.);

- помехи коммутации и плохих контактов.

- Внешние помехи (обуславливаются действием внешних источников естественного происхождения, а также активные помехи):

- переходные помехи (в металлических кабелях);
- промышленные помехи (от линий передачи, ТВ вещания и т.п.);
- грозовые и атмосферные помехи.

##### 2. По форме сигнала:

- Непрерывные помехи:  $S_{\max} > (3 \div 10)S_{\text{ср}}$ .

- Импульсные помехи:  $S_{\max} > (100 \div 1000)S_{\text{ср}}$ ,

где  $S_{\text{ср}}$  – среднее напряжение сигналов помехи.

##### 3. По характеру мешающего воздействия:

- Шум любой природы, который складывается с сигналом и для слабых сигналов способен существенно ухудшить разборчивость передаваемого сообщения (речи, данных и т.п.).

- Переходный разговор, возникающий вследствие переходных помех. Внятный переходный разговор нарушает комфортность и конфиденциальность связи, отвлекает абонентов на невольное прослушивание постороннего разговора. Невнятный переходный разговор резко увеличивает шум в канале передачи.

### 3.4.2 Оценка действия помех

Для оценки действия помех применяются характеристики:

1. Защищенность  $A = 10 \lg(P_c/P_n)$  или через уровни мощностей  $A_3 = P_c - P_n$ .

2. Коэффициент шума  $N = \frac{P_{с\text{ вх}}/P_{п\text{ вх}}}{P_{с\text{ вых}}/P_{п\text{ вых}}}$  – характеризует возрастание

шума внутри активных приборов прежде всего за счет дробовых шумов.

3. Псофометрическое напряжение (это взвешенное, усредненное в полосе частот напряжение шума).

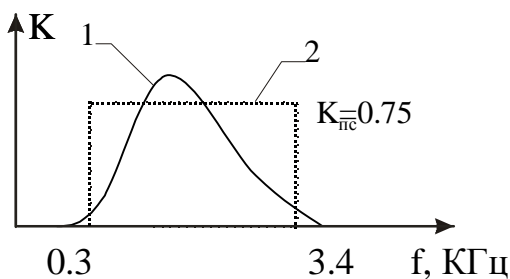


Рисунок 3.19 – Частотная характеристика системы «канал ТЧ + ухо человека»

На рисунке 3.19 представлена частотная характеристика системы «канал ТЧ + ухо человека» (1) и его псофометрический эквивалент (2).

### 3.4.3 Нормирование помех (по ITU-T)

Для стандартизации качества связи ITU-T выбраны эталонные цепи с заданной протяженностью, числом переприемов и суммарной мощностью помех. Переприем – операция приема сигнала на усилительном пункте, выделение необходимых каналов и дальнейшая передача. Структура цепи (число и тип переприемов) зависит от применяемой системы передачи. Существуют схемы номинальных цепей для местного, внутризонового и магистрального участков сети. В качестве примера рассмотрим магистральный тракт передачи с длиной  $L_{\text{магистрали}} = 2500$  км, построенный на коаксиальном кабеле К-60П (рисунок 3.20).

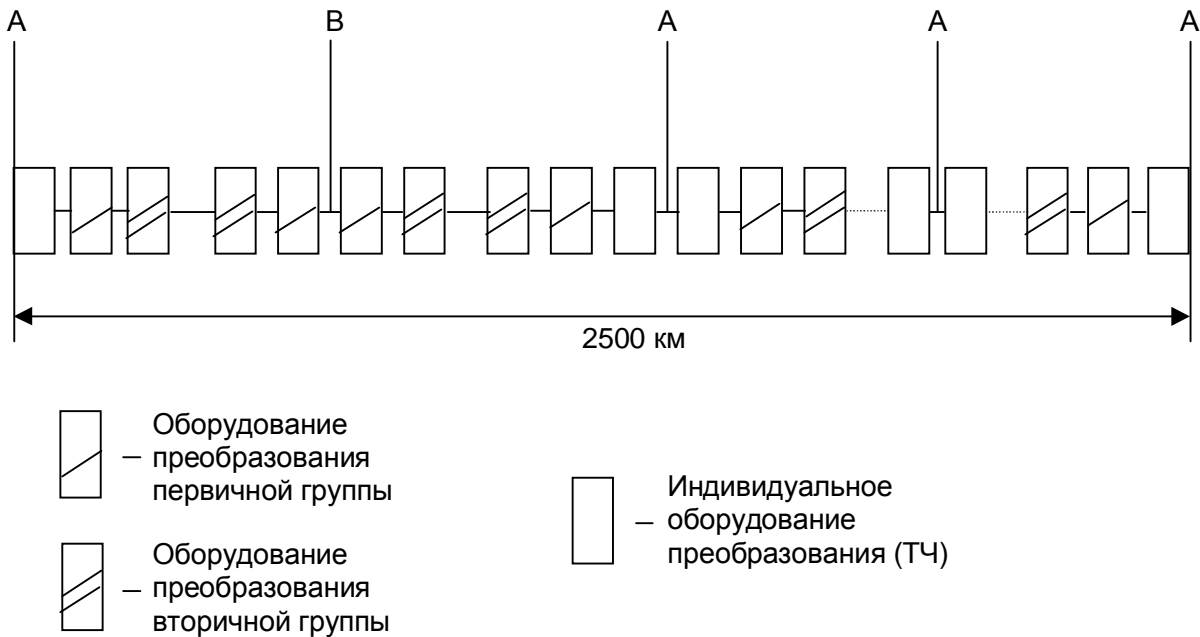


Рисунок 3.20 – Магистральный тракт передачи с длиной 2500 км

Здесь применяются два переприема по ТЧ (точки А), где возможно выделение сигналов индивидуальных пользователей. Внутри каждого участка А-А один переприем по первичной группе (точка В), где может выделяться и ответвляться на другие групповые тракты одна или несколько первичных групп. Для передачи группового сигнала непосредственно на магистральных участках используется вторичная группа.

Один из важнейших показателей, определяющих качество связи, – защищенность от помех, которую принято оценивать по мощности (или уровню) помех в точке с нулевым относительным уровнем (ТНОУ).

Значение допустимой мощности помех в психофотметрических единицах для участка протяженностью 2500 км:  $P_{\Sigma} \leq 10000 \text{ пВт0 ПСОФ (в ТНОУ)}$ . Из этой допустимой мощности помех на преобразовательное оборудование отводится  $P_{\text{ппо}} = 2500 \text{ пВт0 ПСОФ}$ , а на линейный тракт  $P_{\text{плт}} = 7500 \text{ пВт0 ПСОФ}$ , то есть  $P_{\Sigma} = P_{\text{ппо}} + P_{\text{плт}}$  ПСОФ (в ТНОУ).

Так как в аналоговых системах передачи имеет место явление накопления помех, то можно условно считать, что на 1 км линейного тракта магистрального участка приходится мощность помех  $P_{\text{плт}}/1 \text{ км} = 7500 \text{ пВт0}/2500 \text{ км} = 3 [\text{пВт0/км}]$ , при норме  $1 \div 3 [\text{пВт0/км}]$ .

Кроме того, нормируются составы шумов, так, например, мощности шумов должны относиться друг к другу:

- В четырехпарном кабеле

$$P_{\text{собственной помехи}} : P_{\text{нелинейной помехи}} : P_{\text{помехи линейного тракта}} = 1 : 1 : 2.$$

- В коаксиальном кабеле

$$P_{\text{собственной помехи}} : P_{\text{нелинейной помехи}} = 1 : 1.$$



### 3.4.4 Накопление собственных помех в линейном тракте

Одним из существенных недостатков аналоговых систем передачи является накопление собственных помех в линейном тракте по мере прохождения сигнала. Рассмотрим участок линейного тракта, состоящий из источника сигнала (генератора), линии передачи (ЛП) и усилителя (У) (рисунок 3.21).

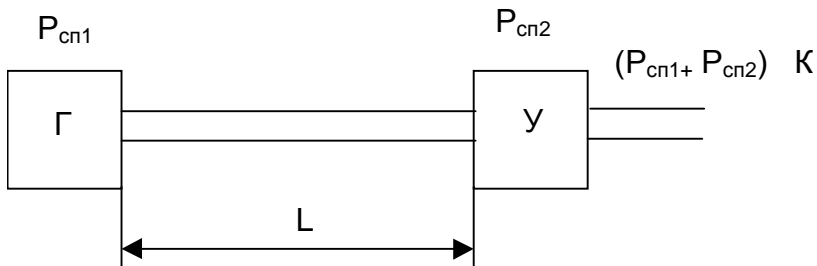


Рисунок 3.21 – Схема участка линейного тракта

Генератор содержит в своем составе усилитель с мощностью собственных шумов, приведенных ко входу,  $P_{сн1}$  и коэффициентом усиления по мощности  $K$ . Мощность собственных шумов складывается из мощностей тепловых и дробовых шумов.

$$P_{тш} = k \cdot T \cdot \Delta f, \quad (3.1)$$

где  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/град – постоянная Больцмана,

$T$  – температура,  $\Delta f$  – полоса частот линейного тракта.

Мощность дробовых шумов характеризуется коэффициентом шума

$$N = \frac{P_{свх} / P_{швх}}{P_{сввых} / P_{шввых}} = \frac{1}{K} \cdot \frac{P_{шввых}}{P_{швх}}. \quad (3.2)$$

Он показывает, во сколько раз уменьшается отношение сигнал-шум на выходе усилителя за счет возникновения дробовых шумов, или во сколько раз увеличивается мощность шума, приведенная ко входу усилителя. Уровень собственных шумов, приведенных ко входу с учетом (3.2):

$$\rho_{сн} = 10 \lg(P_{тш} + P_{дш}) = 10 \lg(P_{тш} \cdot N) = \rho_{тш} + n, \quad (3.3)$$

где  $n = 10 \lg(N)$  – потери шумозащищенности.

Мощность шума на выходе генератора  $P_{сн1} \cdot K$ . Распространяясь по линии, сигнал и шум затухают и это затухание по мощности есть  $A$ . В линейном тракте должно соблюдаться условие поддержания одного и того же уровня сигнала. Для этого коэффициент усиления должен быть равен затуханию в линии

$$K = A. \quad (3.4)$$

Если перейти к уровням передачи, то

$$K_{дБ} = \alpha l, \quad (3.5)$$

где  $K_{дБ}$  – коэффициент усиления в дБ;

$l$  – длина участка линейного тракта, км;

$\alpha$  – коэффициент затухания линии, дБ/км.

При выполнении условия (3.4), на входе усилителя шумы генератора и шумы усилителя будут суммироваться. Поскольку источники шума не коррелированы, то это суммирование можно проводить без учета фазовых соотношений, не когерентно. Поэтому суммарная мощность шумов будет

$$P_{с\pi\Sigma} = P_{с\pi 1} + P_{с\pi 2}.$$

Этот процесс можно продолжить. Для  $m$  участков получим:

$$P_{с\pi\Sigma}(0) = \sum_{i=1}^m P_{с\pi i}(0) = P_{с\pi}. \quad (3.6)$$

Уровень суммарной, приведенной к ТНОУ(1мВт), помехи найдем из (3.6)

$$p_{с\pi\Sigma}(0) = 10 \lg \left( P_{с\pi\Sigma} / \text{мВт} \right) = p_{тш} + d + K_{дБ} + 10 \lg m - p_{г}. \quad (3.7)$$

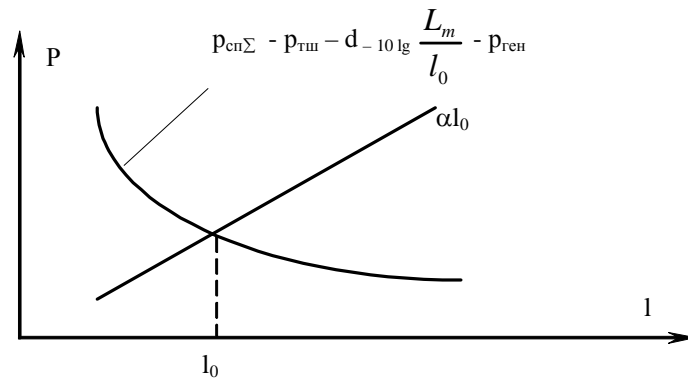
При составлении (3.7) учитывался уровень теплового шума на входе усилителя  $p_{тш}$ , уровень коэффициента шума (потери шумозащищенности)  $d$ , а так же те факторы, что результирующий шум находится на выходе последнего участка, содержащего усилитель с коэффициентом усиления  $K$ , и мощность на выходе генератора  $p_{ген}$  может отличаться от значения 1 мВт. Поэтому в (3.7) в правой части вычитается уровень  $p_{г}$ , соответствующий мощности  $P_{ген}$ .

При рассмотрении и расчете линейных трактов вводится понятие оптимальной длины усилительного участка  $l_0$ , такой, при которой мощность собственных помех на выходе усилителя точно равна нормативному значению. Чтобы найти  $l_0$ , подставим в (3.7)  $K_{дБ} = \alpha l_0$  и выразим  $m$  через длину тракта  $L_m$  и длину участка

$$p_{с\pi\Sigma} = p_{тш} + d + \alpha l_0 + 10 \lg \frac{L_m}{l_0} - p_{ген}. \quad (3.8)$$

Уравнение (3.8) относительно  $l_0$  является нелинейным и может быть решено численными методами или графически (рисунок 3.22).

Для уменьшения влияния собственных помех (увеличение защищенности) необходимо уменьшить полосу частот приемного тракта  $\Delta f$  и применять малошумящие усилители во входных каскадах приемников (снижение коэффициента шума).

Рисунок 3.22 – Графический расчет  $l_0$ 

### 3.4.5 Переходные помехи

Эти помехи в АСП на электрических кабелях возникают в основном за счет электромагнитной связи между параллельными парами проводников в многопарных кабелях. Эта паразитная связь (наводка) имеет несколько механизмов возникновения, основными из которых является связь по электрическому полю. Удельный вес электрической и магнитной составляющей зависит от частоты сигнала, от числа пар в кабеле и их взаимного расположения. Так, например, для канала тональной частоты подавляющий вклад в переходную помеху вносит электрическая составляющая.

При рассмотрении влияния между двумя парами различают два вида перехода энергии: на ближнем (передающем) конце и на дальнем (приемном) конце (рисунок 3.23). Из рисунка видно, что помеха на ближний конец проявляется при встречных движениях сигналов в каналах, а помеха на дальний конец – при согласованной передаче.



Рисунок 3.23 – Возникновение переходных помех:

а) на ближнем конце;

б) на дальнем конце

Помеха на ближний больше, чем помеха на дальний конец, по ряду причин:

1) в силу фазовых соотношений электрическая и магнитная составляющие поля наводки на ближнем конце складываются, в то время как на дальнем конце они вычитаются;

2) наиболее значительная часть наводки возникает вблизи передатчика активной (влияющей) линии. На ближний конец она воздействует непосредственно, в то время как на дальнем конце наводка затухает так же, как и полезный сигнал;

3) эффект синфазного накопления наводки на дальний конец устраняется скручиванием как каждой пары в кабеле, так и всего жгута.

Рассмотрим защищенность системы передачи по переходным помехам. На ближнем конце

$$A_{30} = 10 \lg \left( \frac{P_{\text{пр}}^{\text{II}}}{P_{\text{перпом}}^{\text{I}}} \right) = (p_{\text{Г}}^{\text{II}} - \alpha l) - p_{\text{перпом}}^{\text{II}}, \quad (3.9)$$

где  $P_{\text{Г}}^{\text{II}}$  и  $p_{\text{Г}}^{\text{II}}$  – мощность передатчика II и ее уровень соответственно;

$P_{\text{пр}}^{\text{II}}$  – мощность на входе приемника II;

$P_{\text{перпом}}^{\text{II}}$  и  $p_{\text{перпом}}^{\text{II}}$  – мощность переходной помехи в канале II и ее уровень.

Выразим  $p_{\text{перпом}}^{\text{II}}$  через уровень мощности генератора и переходное затухание

$$A_0 = 10 \lg \left( \frac{P_{\text{Г}}^{\text{I}}}{P_{\text{перпом}}^{\text{II}}} \right) = p_{\text{Г}}^{\text{I}} - p_{\text{перпом}}^{\text{II}}. \quad (3.10)$$

Тогда  $p_{\text{перпом}}^{\text{II}} = p_{\text{Г}}^{\text{I}} - A_0$ .

$$A_{30} = p_{\text{Г}}^{\text{II}} - \alpha \cdot l - (p_{\text{Г}}^{\text{I}} - A_0). \quad (3.11)$$

Если передатчики одинаковы и их уровни мощности равны  $p_{\text{Г}}^{\text{I}} = p_{\text{Г}}^{\text{II}}$ , то

$$A_{30} = A_0 - \alpha \cdot l. \quad (3.12)$$

Это выражение имеет простой смысл. Помеха на ближнем конце линии не зависит от ее длины, в то время как сигнал затухает по мере распространения. Поэтому отношение сигнал-шум (защищенность) уменьшается с увеличением длины линии. На низких частотах (канал тональной частоты) влияние слагаемого  $\alpha l$  в (3.12) несущественно ( $\alpha l \ll A_0$  уменьшается (переходная помеха возрастает), а  $\alpha l$  увеличивается (затухание возрастает) и защищенность по переходной помехе на ближнем конце может стать меньше нормы.

На дальнем конце уровень сигнала передатчика II ослабляется в линии на  $\alpha l$ , а переходная помеха с уровнем  $A_0$ , наведенная передатчиком I, также ослабляется в линии, поэтому

$$A_{3l} = (p_{\text{Г}}^{\text{II}} - \alpha \cdot l) - (p_{\text{Г}}^{\text{I}} - A_0 - \alpha \cdot l) \quad (3.12)$$

если  $p_{\text{Г}}^{\text{I}} = p_{\text{Г}}^{\text{II}}$ , то  $A_{3l} = A_0$

и защищенность по переходной помехе на дальнем конце не зависит от длины линии и больше, чем защищенность на ближнем конце. Уровень переходной помехи на ближнем конце в одно-кабельных системах больше уровня на даль-

нем конце на 10–40 дБ в зависимости от частоты сигналов и длины линии. Способы снижения переходных помех:

- 1) применение скручивания пар в кабеле – снижение помехи на дальнем конце;
- 2) организация передачи в двухкабельных системах, когда все каналы в прямом направлении передаются по проводным парам, собранным в одном кабеле, а все встречные каналы в другом кабеле, изолированном от первого металлической экранирующей оболочкой. При этом наиболее существенная помеха на ближний конец практически устраняется;
- 3) для устранения внятного переходного разговора при согласованной передаче применяется инверсия или сдвиг спектра сигналов (рисунок 3.24).

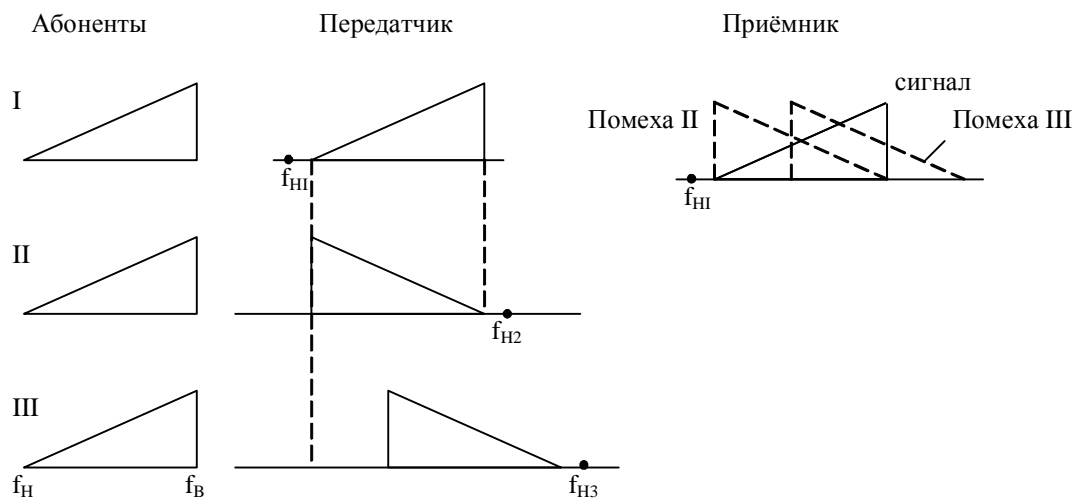


Рисунок 3.24 – Устранение внятных помех

В этом случае внятная переходная помеха превращается в невнятную (помеха III). Ослабление помехи может составлять 5–25 дБ.

### 3.4.6 Нелинейные помехи

Нелинейные помехи возникают как в сугубо нелинейных приборах (преобразователи частоты, детекторы и т.п.), так и в усилительных элементах, особенно в ограничителях и выходных каскадах усилителей мощности за счет отклонения их вольтамперной характеристики от линейной. Как и другие виды помех нелинейные помехи накапливаются от участка к участку.

Продуктами нелинейности являются гармоники (в основном вторая и третья) и комбинационные составляющие типа  $nf_1 + mf_2 + kf_3 + \dots$ , если  $f_1, f_2, f_3, \dots$  – частоты составляющих на входе усилителя, а  $n, m, k = 1, 2, 3, \dots$ . Чтобы нелинейные составляющие помех были меньше нормы, напряжение сигнала не должно превышать порог перегрузки усилителя  $U_n$  или уровень  $p_r$ .

Порогом перегрузки является уровень мощности  $p_n$  на выходе усилителя, при котором увеличение уровня сигнала на входе на 1 дБ приводит к увеличению уровня третьей гармоники на выходе на 20 дБ.

Для количественной оценки нелинейных свойств канала вводят понятие затухания нелинейности по второй и третьей гармоникам

$$a_{2Г} = 10 \lg \left( \frac{P_{1Г}}{P_{2Г}} \right) = p_{пер} - p_{2Г}$$

$$a_{3Г} = 10 \lg \left( \frac{P_{1Г}}{P_{3Г}} \right) = p_{пер} - p_{3Г},$$

где  $P_{1Г}$ ,  $P_{2Г}$ ,  $P_{3Г}$  — мощности первой, второй и третьей гармоник, а  $p_{пер}$ ,  $p_{2Г}$ ,  $p_{3Г}$  — их уровни соответственно.

Заводы-изготовители обычно нормируют значения  $a_{2Г}$  и  $a_{3Г}$ .

Для снижения уровня нелинейных помех применяют обязательную их нормировку, стараются комбинировать виды трафика в каналах, чтобы не увеличивать пик-фактор, а также применяют усилители с автоматической регулировкой усиления (АРУ).

## 4 ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ (ЦСП)

### 4.1 Принципы цифровой передачи информации

#### 4.1.1 Структурная схема ЦСП

В настоящее время цифровые методы и устройства передачи информации являются основными в телекоммуникационных системах благодаря совокупности своих достоинств, таких как высокая помехоустойчивость, простота группообразования, возможность интеграции разнородного трафика, высокая технологичность и др. Укрупненная структурная схема ЦСП приведена на рисунке 4.1.1.

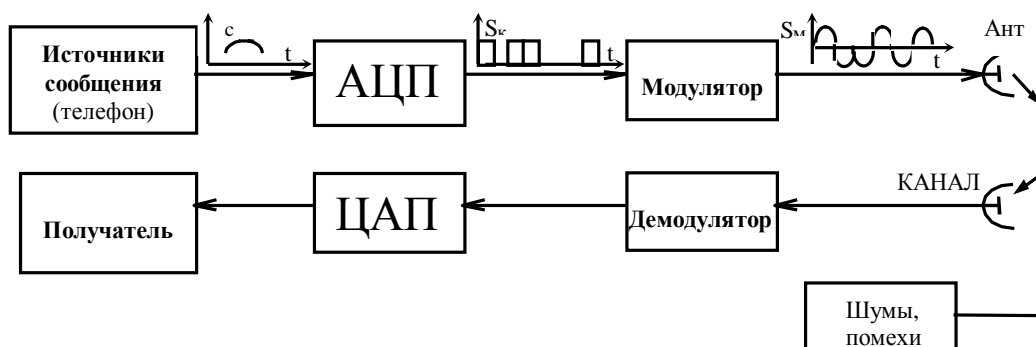


Рисунок 4.1 – Структурная схема ЦСП

Здесь аналоговый сигнал  $S_c(t)$  с выхода источника сообщения проходит через аналого-цифровой преобразователь (АЦП), преобразуясь в двоичный цифровой код  $S_k(t)$ . Для передачи по линии связи (медный кабель, ВОЛС, радиоканал) этот сигнал с помощью модулятора или кодирующего устройства преобразуется к виду  $S_m(t)$ , позволяющему передачу на большие расстояния с минимальными искажениями. В приемной части ЦСП происходят обратные преобразования с помощью демодулятора и цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). В канале передачи сигнал  $S(t)$  искажается при воздействии шумов и помех, которые наиболее эффективно проявляют себя в канале связи и во входных каскадах приемника.

#### 4.1.2 Цифровой сигнал

Рассмотрим процесс формирования цифрового сигнала (рисунок 4.1.2), который можно разбить на три этапа:

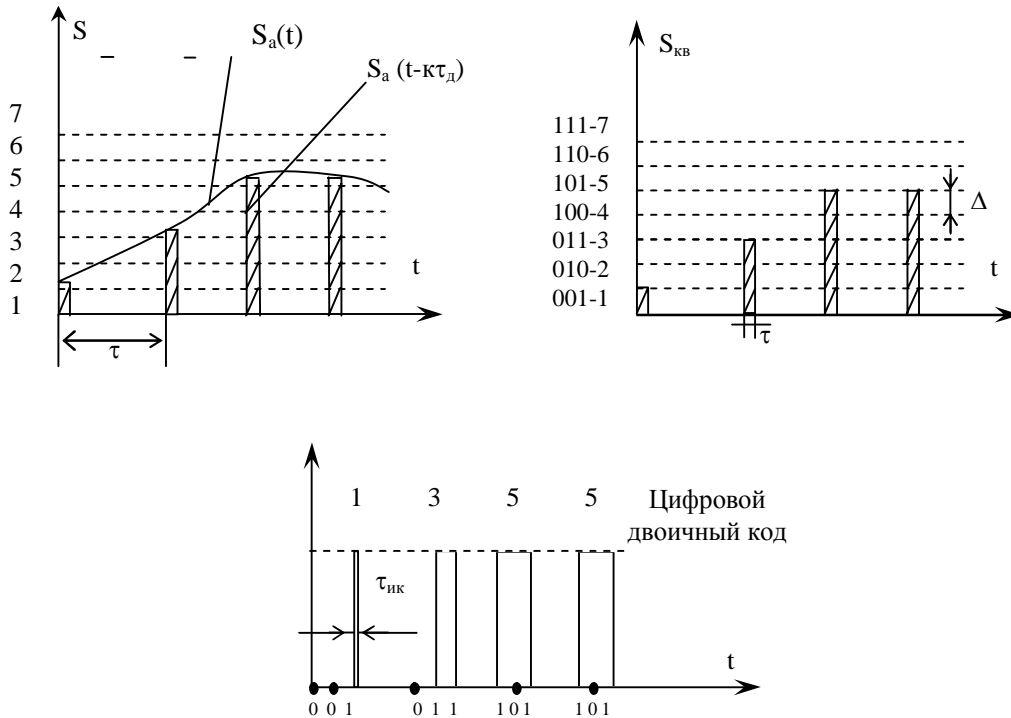


Рисунок 4.2 – Формирование цифрового сигнала  
 а) дискретизация во времени;  
 б) квантование по уровню;  
 в) кодирование (импульсно-кодовая модуляция).

На первом этапе вместо непрерывной функции времени  $S_C(t)$  формируется совокупность дискретных отсчетов  $S_C(t - k\tau_d)$ , взятых в равноотстоящих друг от друга моментах времени с интервалом  $\tau_d$ .

В соответствии с теоремой Котельникова этот интервал определяется верхней частотой в спектре сигнала  $f_B$

$$\tau_d \leq \frac{1}{2f_B}. \quad (4.1)$$

Обосновать это неравенство можно следующим образом. Спектр дискретизируемого сигнала (рисунок 4.1.3) является периодической функцией частоты  $f$  с периодом  $1/\tau_d$ . Для того чтобы лепестки этой функции не перекрывались необходимо, чтобы:

$$1/\tau_d \geq 2f_B.$$

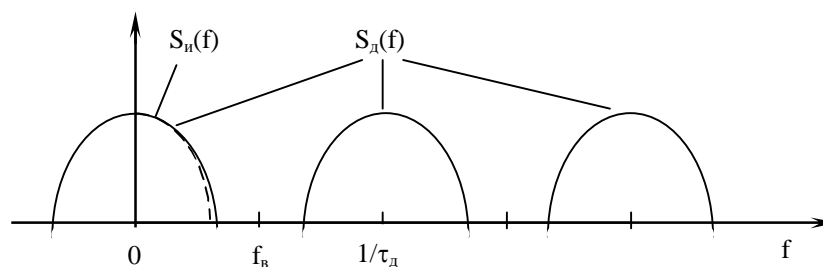


Рисунок 4.3 – Спектр дискретного сигнала



Если это неравенство не выполняется, спектр сигнала искажается в области высоких частот. Во временной области это приводит к тому, что наиболее быстрые изменения сигнала при дискретизации будут пропущены.

Полученный дискретный сигнал или сигнал с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ) может принимать в своих отсчетах любые непрерывные значения. Чтобы число амплитудных значений было конечно, на втором этапе (рисунок 4.1.2, б) проводят операцию квантования. Она заключается в том, что значение отсчета сравнивается с некоторым уровнем, близким к нему, и приравнивается либо к величине этого уровня, либо к другой величине, связанной с ним. Такой величиной, например, может быть среднее значение между соседними уровнями.

При равномерном квантовании расстояние между соседними уровнями (шаг квантования)  $\Delta$  одинаков. Процесс квантования сопровождается искажениями сигнала, которые тем больше, чем больше  $\Delta$ . Эти искажения можно охарактеризовать мощностью шумов квантования, которая пропорциональна величине  $(\Delta/2)^2$ . Поскольку отсчеты дискретного сигнала  $S_k$  являются случайной величиной, статистическое усреднение для равномерного квантования приводит к результату:

$$P_{\text{ш кв}} = \frac{1}{3} \left( \frac{\Delta}{2} \right)^2 = \frac{\Delta^2}{12}. \quad (4.2)$$

В свою очередь шаг квантования  $\Delta$  зависит от максимального значения сигнала  $S_{\text{max}}$  и числа уровней  $n$ .

Число уровней квантования можно найти, задавая отношение сигнал-шум, если в качестве основного источника шума взять шумы квантования.

$$\frac{P_{\text{сиг}}}{P_{\text{ш кв}}} = 10 \lg \frac{\bar{S}^2}{\frac{\Delta^2}{12}} = 10.8 + 20 \lg \frac{S_{\text{ср}}}{\Delta}. \quad (4.3)$$

Если сигнал гармонический:

$$S = S_m \cos \omega_0 t, \quad \text{то}$$

$$\frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}} = 10 \lg \left[ \frac{\frac{S_m^2}{2}}{\frac{\Delta^2}{12}} \right] = 7.78 + 20 \lg \frac{S_m}{\Delta} = 7.78 + 20 \lg n. \quad (4.4)$$

В (4.3) и (4.4) –  $\bar{S}$  – среднее значение, а  $S_m$  – амплитуда сигнала.

В соответствии с требованиями стандартов минимум качества обеспечивается при  $\frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}} = 26 \text{ дБ}$ . Подставляя это значение в (4.4), найдем  $n=8$ .

Но это соотношение должно выполняться для самого минимального входного сигнала. Если учесть динамический диапазон сигнала на входе и взять случай более высокого качества передачи, то число уровней  $n$  будет много больше 8. Так если  $D=40$  дБ, то  $n=800$ , а разрядность кодера  $r=10$ .

Приведенный пример указывает на избыточность, возникающую при формировании цифрового сигнала, поскольку нет необходимости большие значения входного сигнала передавать с такой же точностью, что и малые. Поэтому при квантовании применяют процедуру неравномерного квантования (рисунок 4.4), когда шаг квантования входного сигнала увеличивается с ростом сигнала. Эта процедура называется компрессией или сжатием динамического диапазона. На практике компрессию совмещают с кодированием, применяя кусочно-линейную характеристику вместо логарифмической (рисунок 4.5). При этом угол наклона отрезков прямых в каждом сегменте уменьшается в два раза. Применение неравномерного квантования позволяет ограничить число разрядов  $r=8$ .

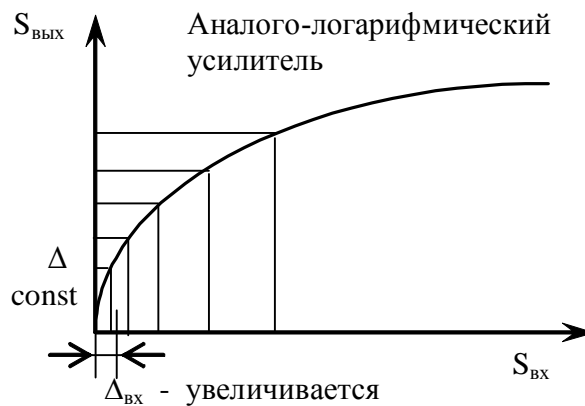
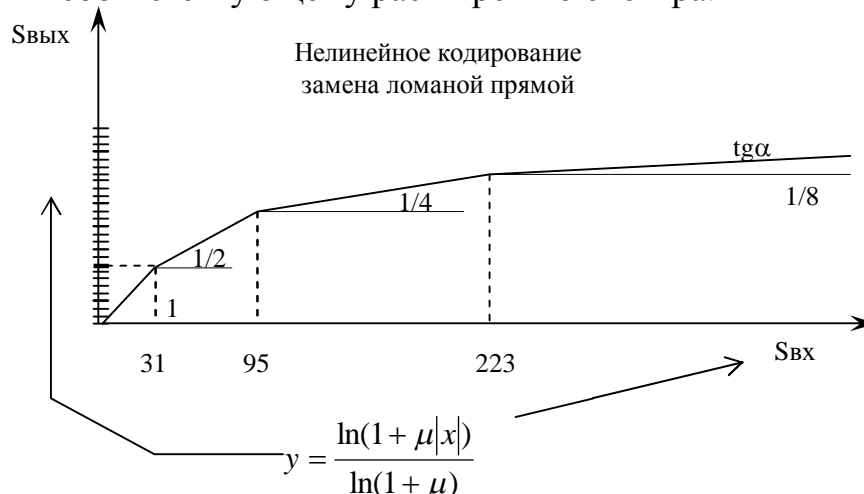


Рисунок 4.4 – Неравномерное квантование

На третьем этапе сигнал  $S_{кв}(t)$ , дискретный во времени и по амплитуде, с помощью импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) преобразуется в цифровой код. Наиболее распространенным является двоичный цифровой код (рисунок 4.2, в). Особенностью этого кода, представленного набором электрических импульсов, является то, что длительность каждого импульса в кодовой комбинации ИКМ

$\tau_{ик} = \frac{\tau_{и}}{r}$  в  $r$  раз меньше длительности исходного импульса. Это приводит к соответствующему расширению спектра.



### 4.1.3 Группообразование

Поскольку длительность импульса дискретизации (выборки)  $\tau_n$  много меньше  $\tau_d$

$$\tau_n \ll \tau_d,$$

временной интервал  $\tau_d$  между соседними импульсами одной функции  $S_1(t)$  можно заполнить отсчетами других каналов (рисунок 4.6). В этом случае каналы разделяются во времени и передаются в одной и той же полосе частот. Этот процесс носит название временного разделения каналов (ВРК) или группообразования. Время, за которое формируется группа, называется циклом. Длительность цикла есть время цикла  $\tau_{ц}$ . Нетрудно увидеть, что  $\tau_{ц}$  равно времени дискретизации:

$$\tau_{ц} = \tau_d.$$

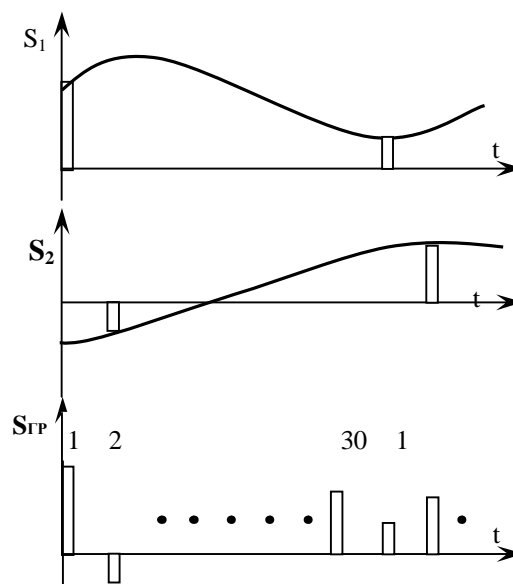


Рис.4.6- Группообразование

### 4.1.4 Линейное кодирование

Цифровой сигнал после процедуры группообразования и АЦП имеет вид, представленный на рисунке 4.7, а. Он является однополярным и в нем трудно выделить три типичных ситуации:

- 1) чередование нулей и единиц;
- 2) последовательность одних единиц;
- 3) последовательность одних нулей.

Однополярный характер сигнала требует больших энергетических затрат. Для того, чтобы увидеть это, сравним энергию  $W$ , необходимую для передачи двух битов в электрической линии с помощью однополярного  $S_1(t)$  и биполярного  $S_2(t)$  сигналов (рисунок 4.8). Если сопротивление нагрузки  $R=1\text{Ом}$ ,  $\tau = 1\text{сек.}$ , то

$$W = \frac{S_1^2}{R} \cdot \tau + \frac{S_2^2}{R} \cdot \tau,$$

$$W_1 = 1 \text{ Вт} \cdot \text{сек.},$$

$$W_2 = 0.5 \text{ Вт} \cdot \text{сек.}$$

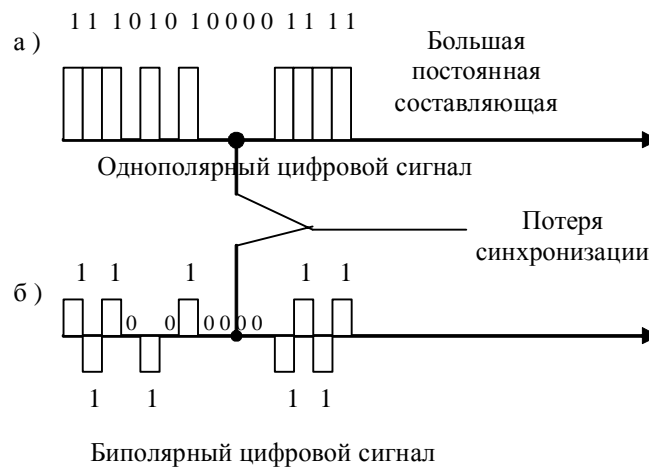


Рисунок 4.7 – Преобразование к коду передачи

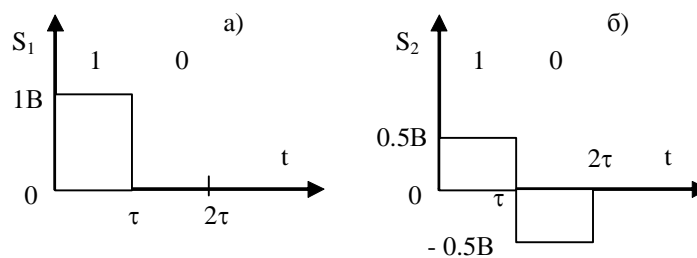


Рисунок 4.8 – Элементарные цифровые сигналы

При одинаковой помехоустойчивости (перепад между состояниями равен 1В) преимущества биполярного сигнала очевидны.

Наиболее простым переходом от однополярных сигналов к биполярным является применение кодов ЧПИ (чередование полярности импульсов, рисунок 4.7, б). Здесь каждый четный импульс меняет полярность.

Как у однополярного сигнала, так и у сигналов ЧПИ есть еще один существенный недостаток. Для нормального функционирования ЦСП с ВРК нужна жесткая синхронизация цифрового потока во времени. Поэтому на приемном конце из цифрового потока обычно выделяют тактовую частоту (частоту следования импульсов). Если обратиться к рисунку 4.7, то нетрудно увидеть, что синхронизация нарушается там, где присутствуют последовательно одни единицы или нули. Поэтому в кодах ЧПИ на участках с большим числом нулей добавляют специальные биполярные кодовые комбинации, которые при приеме опознаются и удаляются. Такие коды называют модифицированными ЧПИ (МЧПИ).

Таким образом, для передачи по протяженной линии связи однополярный цифровой сигнал преобразуют с помощью специальных кодов, которые

называют *кодами передачи*, или *линейными кодами*. Помимо ЧПИ и МЧПИ существует много других линейных кодов.

#### 4.1.5 Модуляция

Помимо операции линейного кодирования для качественной передачи цифрового сигнала на большие расстояния по электрическим кабелям и радиолиниям применяют его модуляцию (рисунок 4.9). Модуляция, которая в данном случае называется манипуляцией, может быть амплитудной (АМ), фазовой (ФМ), частотной (ЧМ) или их комбинацией.

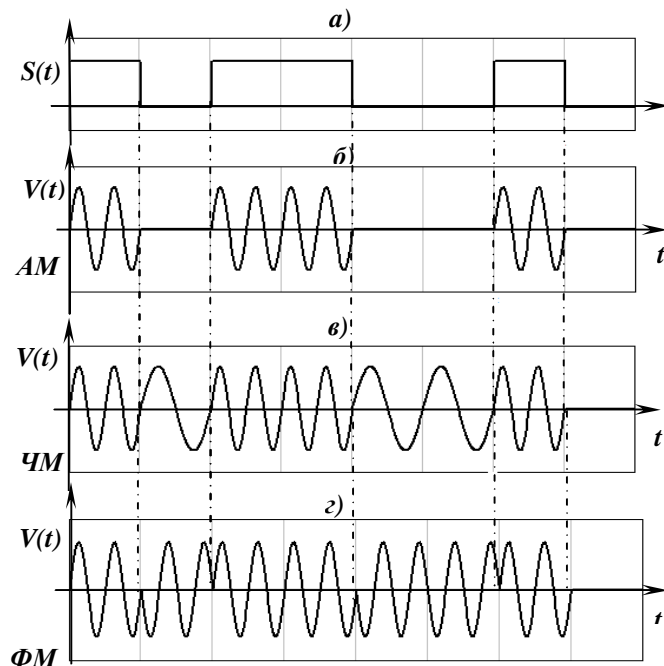


Рис. 4.9 – Модуляция цифрового сигнала:

- а) цифровой сигнал;
- б) амплитудная модуляция;
- в) частотная модуляция;
- г) фазовая модуляция

#### 4.1.6 Оконечная станция ЦСП

С учетом всего изложенного структурная схема ЦСП приобретает более развернутый, но далеко не окончательный вид (рисунок 4.10).

Здесь сигнал от абонента проходит через дифференциальную систему и фильтр нижних частот (ФНЧ), подвергается аналогово-цифровому преобразованию с помощью амплитудно-импульсного модулятора (АИМ), компрессора и кодера ИКМ. Устройство объединения к сигналам от абонентов подмешивает служебные сигналы (синхронизация, сигнализация и др.), которые помещаются на свои временные позиции в виде специальных кодовых комбинаций. Операцией компоновки группового сигнала управляет распределитель сигналов, частота следования импульсов задается тактовым генератором. На приемном конце линии связи происходят обратные преобразования.

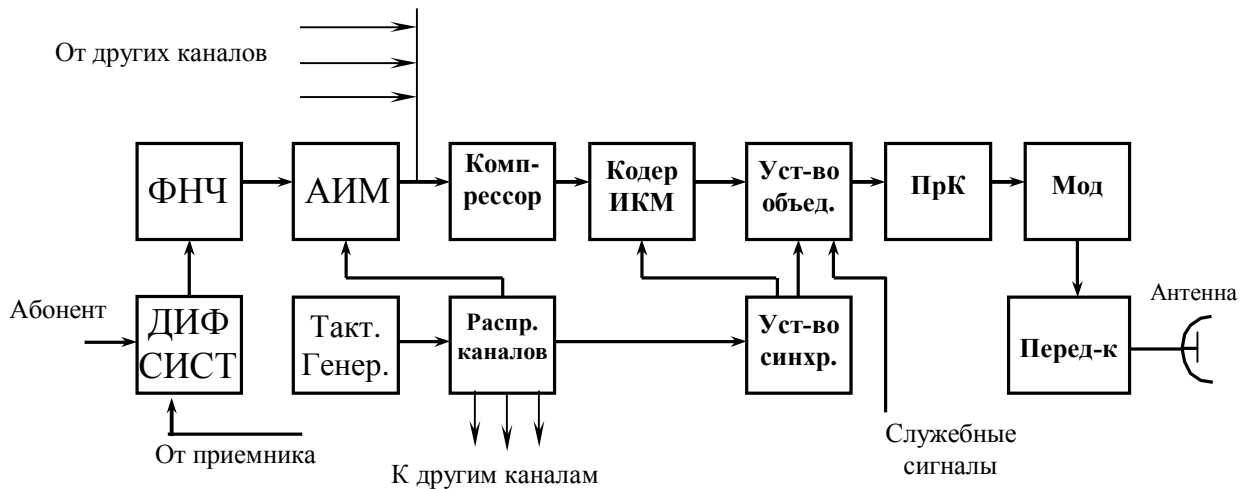


Рис. 4.10 – Структурная схема оконечной ЦСП (передающий канал)

#### 4.1.7 Достоинства и недостатки ЦСП

К достоинствам цифровых методов передачи относятся:

- высокая помехоустойчивость обеспечивается наличием в двоичном цифровом сигнале всего двух состояний. В связи с этим воздействие импульсной помехи на цифровую линию передачи не так эффективно, как в случае аналоговой линии (рисунок 4.1.11).

В аналоговой линии помеха существенно искажает форму сигнала, в то время как в цифровой та же помеха не повлияет на принятие решения о приеме «1», если превышено значение порога  $S_{\text{пор}}$ ;

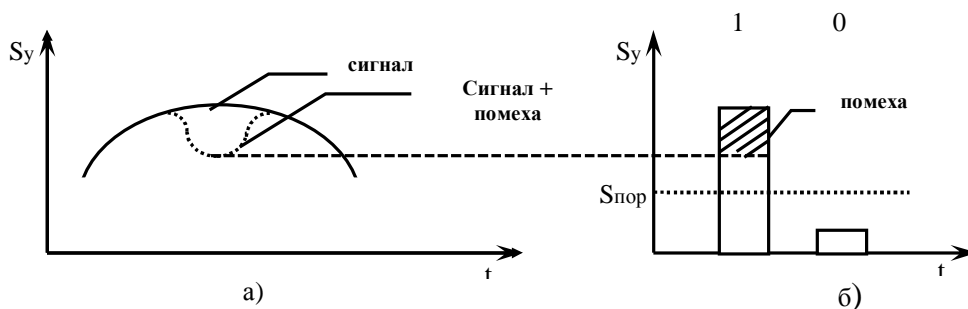


Рис. 4.11 – Воздействие импульсной помехи на аналоговую (а) и цифровую (б) линии передачи

- нечувствительность цифровой системы передачи к искажениям сигнала позволяет реализовать еще одно замечательное свойство – возможность регенерации (рисунок 4.1.12). Здесь при распространении сигнала вдоль линии, происходит его ослабление и искажение формы. При снижении амплитуды до значения, близкого к порогу, регенератор формирует импульс, подобный исходному, и процесс повторяется. Нетрудно убедиться в том, что в такой системе передачи не происходит накопления воздействия шумов и помех по мере прохождения сигнала вдоль линии;

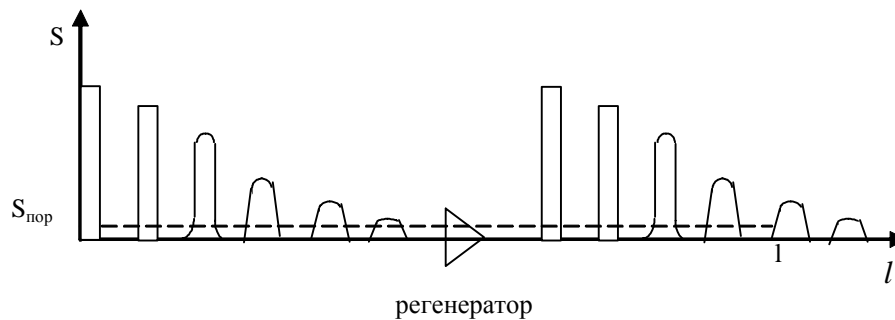


Рисунок 4.12 – Процесс регенерации

- простота группообразования по сравнению с системами с частотным разделением каналов, так как временные мультиплексоры и демультиплексоры существенно проще в реализации, чем система гетеродинов и частотно-избирательных фильтров;
- возможность интеграции услуг телефонии, передачи данных и телевидения, поскольку при преобразовании в цифровую форму сигналы для всех видов трафиков приобретают универсальную форму (двоичный сигнал);
- возможны различные процедуры обработки цифровых сигналов (фильтрация, кодирование и др.) в процессе их передачи и приема в реальном масштабе времени;
- экономичность производства и эксплуатации оборудования ЦСП, его малый вес и габариты благодаря применению технологий современной микроэлектроники.

Одним из замечательных свойств цифровых сигналов является возможность количественной оценки любых самых различных видов информации. Дадим здесь определение количества информации. Количество информации - это энтропия или мера неопределенности в поведении источника дискретных (счетных) данных. Раскрывая эту неопределенность с помощью переданных нам сообщений, мы и получаем информацию. Поясним это определение на простом примере, который связан с прогнозом погоды.

Пусть мы имеем два возможных события: 1-нет осадков, 2-осадки. Получив информацию о будущем состоянии погоды, мы ликвидируем неопределенность наших знаний и получаем какой-то объем информации. Увеличим точность прогноза до четырех возможных состояний: 1-нет осадков, 2-осадки до обеда, 3-осадки после обеда, 4-осадки ночью. Очевидно, что здесь объем полученной информации  $S$  будет больше, чем в первом случае. Видно, что чем больше число возможных состояний (уровней)  $l$  в информационном поле, тем больше ее объем.

Было предложено эту связь выразить логарифмической зависимостью.

Для наиболее простого случая, когда значения уровней не зависят друг от друга и их появление равновероятно

$$S = \log_2 l$$

Другие более сложные случаи рассмотрены в публикациях по теории информации. Для наших двух примеров, объем передаваемой информации будет

$$C_1 = \log_2 2 = 1 \text{ единица информации}$$

$$C_2 = \log_2 4 = 2 \text{ единицы информации}$$

Теперь нужно ввести единицу информации. Ею является количество информации, передаваемое за одну посылку, если число уровней информации  $l = 2$  (0 и 1). Эта единица носит название бит. Выражение (2.5) позволяет с единичных позиций измерить количество информации в любых информационных потоках (речь, видео и др.). Для этого необходимо определить число уровней  $l$  в каждом отсчете и число этих отсчетов. Так для основного цифрового канала обычно  $l = 256$ .

К недостаткам цифровых методов передачи можно отнести:

- расширение частотного диапазона, необходимого для передачи информации. Это происходит вследствие того, что информация передается последовательностью коротких импульсов с широким спектром;
- необходимость четкой синхронизации процессов во времени.

Эти недостатки преодолеваются при совершенствовании методов передачи.

## 4.2 Компандирование в ЦСП

При равномерном квантовании шаг квантования  $\Delta$  одинаков как для малых, так и для больших значений входных сигналов. Это приводит к появлению избыточности при передаче, которая проявляется следующим образом:

- число отсчетов  $n$  в заданном динамическом диапазоне равномерно распределено и при заданных критериях качества будет составлять  $n = 2000\text{--}4000$ ;
- защищенность системы передачи по отношению к шумам квантования

$$A_{\text{зс}} = \frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{шкв}}} = \frac{P_{\text{с}}}{\Delta^2 / 12},$$

при постоянном  $\Delta$  будет увеличиваться с ростом амплитуды и, соответственно, мощности входного сигнала  $P_{\text{с}}$ , т.е. будет не постоянной. Таким образом, сильные сигналы передаются с лучшей помехоустойчивостью;

- значения входного сигнала  $U_{\text{с}}$  являются случайной величиной. Вероятность их появления характеризуется плотностью  $p(U_{\text{с}})$  (рисунок 4.13), причем вероятность появления больших значений невысока. Это объясняется тем, что мы произносим громкие звуки гораздо реже, чем тихие. Поэтому шумы квантования для больших значений  $U_{\text{с}}$  не так существенны, как для малых.

Все эти факторы обосновывают применение нелинейного кодирования или неравномерного квантования.

Основные требования, предъявляемые к таким кодерам:

- восьмиразрядная кодовая комбинация;
- возможность регистрации полярности сигнала;
- минимизация шумов квантования;



- слабая зависимость защищенности от шумов квантования в заданном динамическом диапазоне;
- компрессия должна быть совмещена с кодированием.

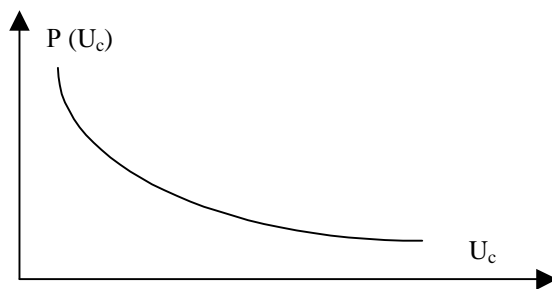


Рисунок 4.13 – Плотность распределения вероятности значений входного сигнала

В практике нелинейного кодирования можно использовать следующие методы:

**1. Аналоговое компандирование (рисунок 4.14).**

Здесь вначале с помощью аналогового компрессора сжимается динамический диапазон входного сигнала, затем производится равномерное квантование с числом уровней квантования  $n = 2^8 = 256$  и кодирование. Если сигнал биполярный, то применяют симметричный двоичный код, когда первый разряд используется для передачи знака сигнала, а остальные семь для передачи его значения. На приемном конце используется обратная операция экспандирования. Поэтому весь процесс сжатия и расширения динамического диапазона называют компандированием.



Рисунок 4.14 – Принцип аналогового компандирования

В современных ЦСП находят применение две логарифмические характеристики (рисунок 4.15) компандирования  $y=f(x)$ , где

$$y = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{огр}}}, \quad x = \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{огр}}},$$

1) А – типа

$$y = \begin{cases} \frac{A|x|}{1 + \ln A} & 0 \leq |x| \leq \frac{1}{A} \\ \frac{1 + \ln(A|x|)}{1 + \ln A} & \frac{1}{A} \leq |x| \leq 1 \end{cases},$$

где  $A = 87,6$ ;

$A$  и  $\mu$  – параметры компрессии, характеризующие степень сжатия;

$U_{огр}$  – уровень ограничения входного сигнала.

2)  $\mu$  – типа

$$y = \frac{\ln(1 + \mu|x|)}{\ln(1 + \mu)}, \quad 0 \leq |x| \leq 1,$$

где  $\mu=255$ .

Характеристика компандирования типа  $A$  используется в ЦСП европейской иерархии, а типа  $\mu$  – североамериканской. В связи с глобализацией телекоммуникационных систем современные ЦСП поддерживают как  $\mu$ , так и  $A$  кодирование.

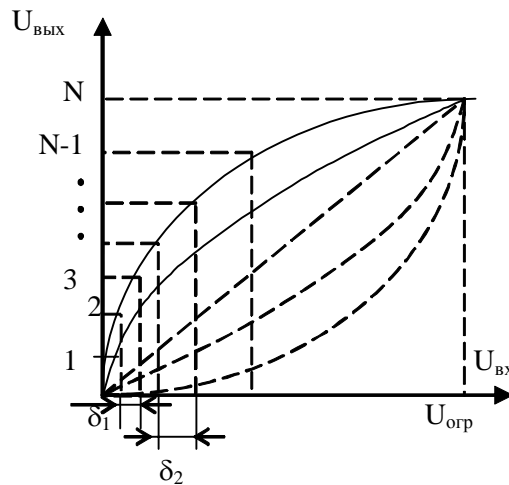


Рисунок 4.15 – Характеристики компрессии и экспандирования

## 2. Нелинейное компандирование.

Этот способ сжатия заключается в том, что плавную характеристику компрессора заменяют кусочно-ломаной кривой и процесс сжатия динамического диапазона совмещают с кодированием так, что на выходе устройства появляется восьмиразрядный двоичный код. Такие компандеры наиболее широко применяются в современных цифровых системах передачи и выполняются с использованием как  $\mu$ , так и  $A$ -характеристик.

Характеристика  $A$ -компрессии для положительных значений входного сигнала приведена на рисунке 4.16.

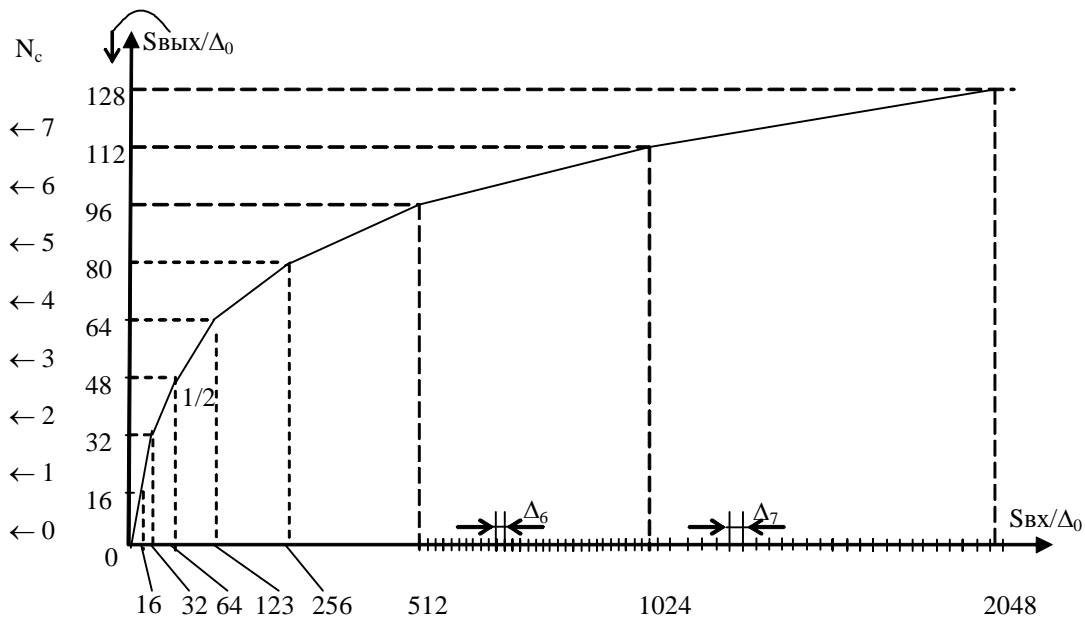


Рисунок 4.16 – Характеристика компандирования типа  $A=87,6/13$

Здесь ломаная кривая содержит 8 сегментов для положительных значений входного сигнала и столько же отрицательных. Нумеруются сегменты так: 0,1,2...7. Каждый сегмент с номером  $N_c$  содержит 16 позиций с одинаковым шагом квантования  $\Delta_N$ . Для удобства цифрового кодирования при переходе от сегмента к сегменту шаг квантования увеличивается в два раза. Поскольку в выходном сигнале шаг квантования одинаков во всех сегментах, угол наклона отрезков прямых в соседних сегментах должен отличаться в два раза. Для  $A$ -характеристики компрессии это условие ближе всего для значения параметра  $A=87,6$ . На практике сегменты с номерами 0 и 1 имеют одинаковый наклон и одинаковый шаг квантования  $\Delta_0$ . Поэтому реально  $A$ -характеристика имеет не 16, а 13 сегментов и часто ее обозначают  $A=87,6/13$ .

Каждый сегмент характеристики  $A=87,6/13$  начинается со значения эталонного напряжения  $U_{\text{эт}}^N$ . Значения  $U_{\text{эт}}^N$  и другие характеристики приведены в таблице 4.2.1, где они даны относительно минимального шага квантования  $\Delta_0$ .

Таблица 4.1 Характеристики компрессии

№ сегмента	Кодовая комбинация N сегмента XYZ	$U_{Y0}^N$	Шаг квантования $\Delta_N$	Сигнал коррекции
0	000	0	1	0,5
1	001	16	1	0,5
2	010	32	2	1
3	011	64	4	2
4	100	128	8	4
5	101	256	16	8
6	110	512	32	16
7	111	1024	64	32

Максимальное значение входного сигнала  $2048 \Delta_0$ , а выходной сигнал имеет 128 положительных и 128 отрицательных отсчетов (всего 256).

Структура кодовой комбинации  $A=87,6/13$  имеет вид

P	X	Y	Z	A	B	C	D
---	---	---	---	---	---	---	---

где P – знаковый разряд (1 – для положительных значений; 0 – для отрицательных),

XYZ – кодовая комбинация N сегмента,

ABC D – код номера позиции входного сигнала внутри сегмента.

Так, например, код 00110101 обозначает сигнал с отрицательным значением в сегменте с  $N_c=3$  и позицией внутри сегмента  $N=5$ . Значение входного сигнала в соответствии с рисунком и таблицей будет

$$S_{\hat{a}\hat{o}} = U_{\hat{y}\hat{o}}^3 + 5 \cdot \Delta_3 = (64 + 5 \cdot 4) \Delta_0 = 84 \Delta_0.$$

Поскольку шаг квантования  $\Delta_3 = 4$ , то код 00110101 будут давать также значения  $85\Delta_0$ ,  $86\Delta_0$  и  $87\Delta_0$ . Ошибка квантования будет меняться от 0 до  $3\Delta_0$ . Для ее компенсации при декодировании вводится сигнал коррекции, равный половине шага квантования  $\frac{\Delta_N}{2}$ . В данном примере сигнал коррекции равен  $2\Delta_0$ .

Операции нелинейного компандирования и экспандирования реализуются в нелинейных кодеках взвешивающего типа. Суть кодирования состоит в последовательном сравнении входного отсчета с набором эталонных напряжений.

Процесс кодирования включает три этапа:

- 1) формирование знакового символа (такт 1);
- 2) формирование кода номера сегмента XYZ (такты 2–4), путем сопоставления входного сигнала с эталонными напряжениями сегментов  $U_{\text{эт}}^N$ ;
- 3) формирование кода номера позиции внутри сегмента ABCD (такты 5–8), когда к эталонному напряжению  $U_{\text{эт}}^N$  добавляются эталонные напряжения, соответствующие позициям внутри сегмента, и происходит их сравнение с входным отсчетом.

### 3. Нелинейное кодирование.

Здесь входной сигнал подвергается равномерному квантованию с большим числом разрядов  $n=12$ . Кодер преобразует дискретные амплитудные отсчеты во временной 12-позиционный двоичный код. В цифровом компрессоре этот код преобразуется в 8-разрядный нелинейный код по законам A или  $\mu$ . Способ преобразования для закона A показан в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Нелинейное кодирование

N сегмента	Код			
	12-разрядный	8-разрядный		
			XYZ	
0	P 0 0 0 0 0 0 0 A B C D	P	0 0 0	A B C D
1	P 0 0 0 0 0 0 1 A B C D	P	0 0 1	A B C D
2	P 0 0 0 0 0 1 A B C D x	P	0 1 0	A B C D
3	P 0 0 0 0 1 A B C D x x	P	0 1 1	A B C D
4	P 0 0 0 1 A B C D x x x	P	1 0 0	A B C D
5	P 0 0 1 A B C D x x x x	P	1 0 1	A B C D
6	P 0 1 A B C D x x x x x	P	1 1 0	A B C D
7	P 1 A B C D x x x x x x	P	1 1 1	A B C D

Основная процедура нелинейного кодирования сводится к следующему:

- 1) разряд «Р», определяющий знак, остается неизменным;
- 2) все нули после разряда «Р», как незначимые, отбрасываются;
- 3) вместо них вставляется комбинация XYZ, определяющая номер сегмента в двоичном коде;
- 4) все старшие значащие разряды ABCD переписываются без изменений вслед за символами XYZ;
- 5) все остальные младшие разряды, помеченные знаком «х», отбрасываются вне зависимости от их значения. Таким образом, ошибка квантования возрастает с номером сегмента.

Нелинейное декодирование осуществляется так. По структуре кодовой комбинации P XYZ ABCD определяется знак отсчета и номер сегмента (по XYZ). Для известного номера сегмента задается эталонное напряжение  $U_{ЭТН}$ , соответствующее нижней границе N сегмента. После этого по известной комбинации ABCD определяется положение отсчета внутри сегмента. Наконец с целью минимизации ошибки квантования добавляется напряжение, равное половине шага квантования в данном сегменте  $\Delta_N$ . С учетом сказанного напряжение на выходе декодера можно представить в виде:

$$U_{АИМ} = \pm (U_{\dot{Y}O}^N + (\hat{A} \cdot 8 + \hat{A} \cdot 4 + \tilde{N} \cdot 2 + D + 0.5) \Delta_N),$$

где A,B,C,D принимают значение 0 или 1, а  $U_{ЭТН}^N$  и  $\Delta_N$  для А-компрессора определены ранее. В качестве примера рассмотрим кодирование и декодирование значения АИМ сигнала:

$U_{АИМ} = +934 \Delta_0$ . В двенадцати разрядном коде оно будет иметь вид:

101110100110

$$(+1 \cdot 2^9 + 1 \cdot 2^8 + 1 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1)$$

В соответствии с таблицей 4.2.2 номер сегмента N=6 и первый нуль заменяются на 110, следующие за ними четыре значения 1110 остаются, а остальные значения отбрасываются. Восмиразрядный код принимает вид

P XYZ ABCD

1 1 1 0 1 1 0 1

При декодировании получим

$$U_{\text{АИМ}} = +512 \cdot \Delta_0 + (1 \cdot 8 + 1 \cdot 4 + 0 \cdot 2 + 1 \cdot 1 + 0 \cdot 5) \cdot 32 \cdot \Delta_0 = (512 + 432) \cdot \Delta_0 = 944 \cdot \Delta_0$$

Ошибка при восстановлении составила  $+10 \Delta_0$ , что меньше половины шага квантования  $\Delta_6 = 32$ .

### 4.3 Линейные коды

Преобразование цифрового сигнала к виду, позволяющему передавать его с наименьшими помехами и с наибольшей скоростью, называется преобразованием к коду передачи, а сами коды – линейными или кодами передачи.

К таким кодам относятся блочные, биимпульсные коды, коды СМІ, МЧПИ и др.

**Линейные коды** делятся на однополярные и биполярные. Однополярные используются в основном в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС), биполярные – в кабельных системах, радиорелейных линиях (РРЛ).

Однополярные коды делятся на NRZ и RZ коды:

- NRZ – без возврата к нулю, т.е. значение сигнала не возвращается к нулю за время передачи символа (рисунок 4.17).

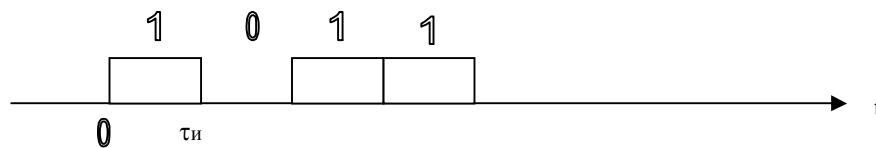


Рисунок 4.17 – Код NRZ

- RZ – с возвратом к нулю, т.е. за время передачи символа сигнал меняет свое значение и возвращается к нулю (рисунок 4.18).

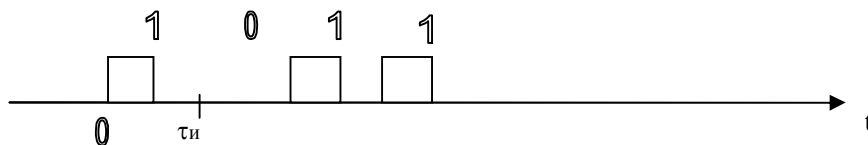


Рисунок 4.18 – Код RZ

В кодах RZ полоса частот увеличивается в два раза относительно кодов NRZ, за счет уменьшения длительности импульса  $\tau_n$ .

Для того, чтобы убедиться в этом, рассмотрим спектры (рисунок 4.20) элементарных сигналов, соответствующих NRZ и RZ кодам (рисунок 4.19).

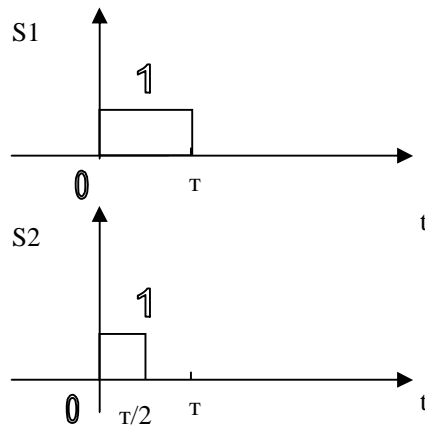


Рисунок 4.19 -Элементарные сигналы, соответствующие NRZ и RZ кодам.

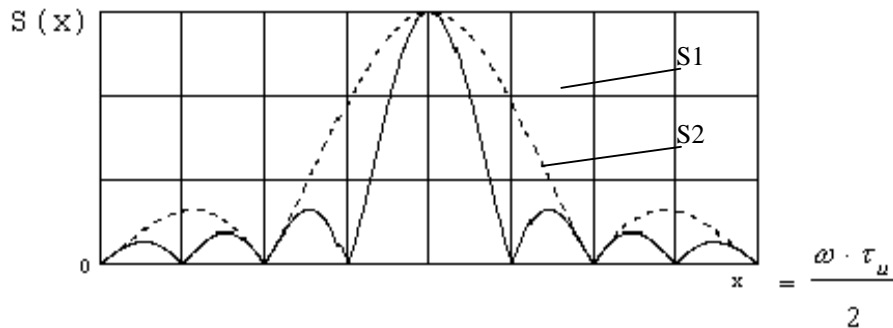


Рисунок 4.20 - Спектры элементарных сигналов, соответствующих NRZ(S1) и RZ(S2) кодам

На графике наглядно видно, что спектр NRZ кода в два раза шире, т.е. NRZ сигнал занимает полосу частот в два раза больше, чем RZ сигнал.

К биполярным кодам относятся коды с чередованием полярности импульсов (ЧПИ), т.е. каждый четный импульс меняет полярность. Эти коды бывают также NRZ и RZ:

- NRZ ЧПИ (рисунок 4.21).

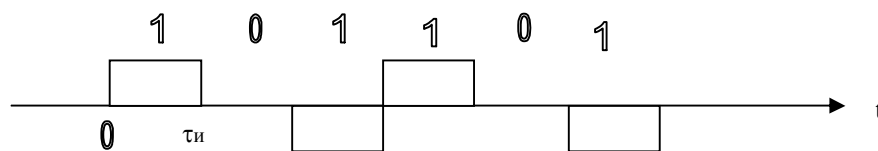


Рисунок 4.21 – Код NRZ ЧПИ

Энергетические показатели данного кода и всех биполярных лучше, чем любого из выше рассмотренных, т.к. в сигнале отсутствует постоянная составляющая, однако, частота тактовой синхронизации в нем не содержится, что резко ограничивает применимость кода. Этот код не позволяет выделить тактовую частоту.

- RZ ЧПИ (рисунок 4.22).

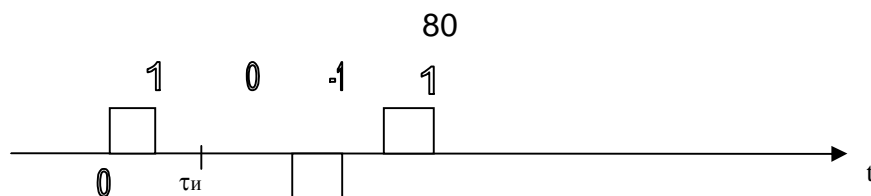


Рисунок 4.22– Код RZ ЧПИ

Он, и ему подобные, чаще всего применяются при передаче цифровых сигналов по электрическим кабелям и РРЛ, поскольку и электрический кабель, и РРЛ легко позволяют передавать отрицательную полярность импульсов.

В кодах ЧПИ для передачи двух символов (1 и 0) используется три состояния (1, 0 и  $-1$ ), т.е. существует избыточность. Эту избыточность используют для обнаружения ошибок. В соответствии с принятым алгоритмом формирования кода в нем не могут следовать подряд два импульса одной полярности.

К **биполярным кодам** относятся также блочные коды, но здесь иначе используется избыточность ЧПИ. В качестве примера приведем троичный код 4В3Т (В – binary), (Т – ternary), когда в трех импульсах передается четыре двоичных символа с использованием специальных кодовых комбинаций (блоков) (см. Таблицу 4.1).

Нетрудно видеть, что число возможных сочетаний уровней передачи  $3^3=27$  больше набора кодовых комбинаций  $2^4=16$  и это обосновывает возможность такой кодировки. Остающаяся избыточность ( $16<27$ ) позволяет реализовать несколько вариантов кода.

Таблица 4.3 - Код 4В3Т

Кодовая комбинация	Сочетание уровней передачи		
	1 вариант	2 вариант	3 вариант
0 0 0 0	-1 -1 -1	+1 +1 +1	0 -1 +1
0 0 0 1	-1 -1 0	+1 +1 0	-1 +1 0
0 0 1 0	-1 0 -1	+1 0 +1	-1 0 +1
0 0 1 1	0 -1 -1	0 +1 +1	+1 -1 +1
0 1 0 0	-1 -1 +1	+1 +1 -1	0 +1 +1
0 1 0 1	-1 +1 -1	+1 -1 +1	0 -1 0
0 1 1 0	+1 -1 -1	-1 +1 +1	0 0 +1
0 1 1 1	-1 +1 0	+1 -1 0	-1 +1 +1
1 0 0 0	+1 0 -1	-1 0 +1	+1 -1 0
1 0 0 1	0 -1 +1	0 +1 -1	-1 0 -1
1 0 1 0	+1 -1 0	-1 +1 0	+1 0 0
1 0 1 1	-1 0 +1	+1 0 -1	+1 0 +1
1 1 0 0	0 +1 -1	0 -1 +1	-1 -1 0
1 1 0 1	-1 +1 +1	+1 -1 -1	+1 +1 -1
1 1 1 0	+1 +1 -1	-1 -1 +1	0 -1 +1



Кодовая комбинация	Сочетание уровней передачи		
	1 вариант	2 вариант	3 вариант
1 1 1 1	+1 -1 +1	-1 +1 -1	+1 -1 -1

Таким образом, вместо каждых четырех импульсов нужно передавать в линию только три. Появляется возможность вместо каждого четвертого импульса цифрового потока передать дополнительные символы, т.е. увеличить объем передаваемой информации и тем самым выиграть в скорости передачи информации.

Рассмотрим **биимпульсные коды**. Здесь каждый символ представляется одним биполярным импульсом (рисунок 4.23).



Рисунок 4.23 – Символы биимпульсных кодов

Приведем пример абсолютного биимпульсного кода (рисунок 4.24):

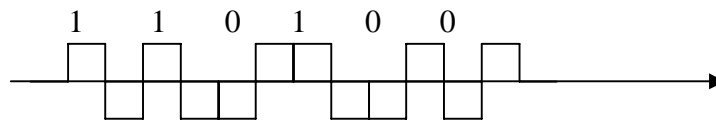


Рисунок 4.24– Абсолютный биимпульсный код

К достоинствам этого кода относятся:

- возможность выделения тактовой частоты;
- отсутствие постоянной составляющей.

А к недостаткам:

- отсутствие избыточности;
- возможность неправильного приема символа, т.к. импульсы отличаются только фазой. Если произойдет случайный «переброс» фазы, то весь сигнал поменяет полярность. Чтобы этого избежать, вводят относительный биимпульсный код. В этом случае приведенная выше последовательность будет выглядеть так, как показано на рисунке 4.25.

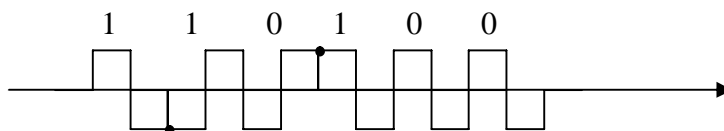


Рисунок 4.25– Относительный биимпульсный код:

• – смена фазы (1)

При этом принятый импульс считается единицей, если произошла смена фаз, и нулем – если нет.

Рассмотрим спектр биимпульсного сигнала (рисунок 4.26).

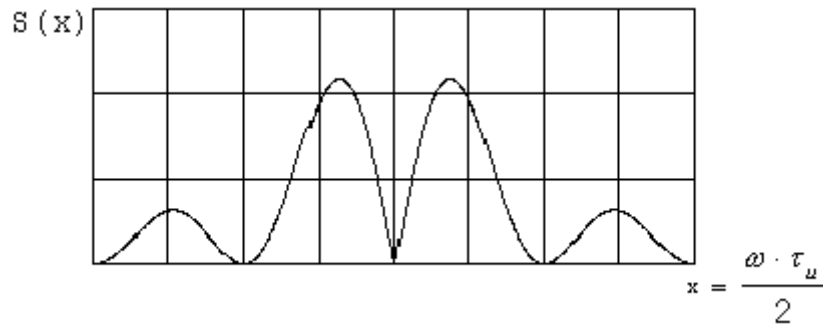


Рисунок 4.26 – Спектр биимпульсного сигнала

Из графика видно, что в данном сигнале отсутствует постоянная составляющая. А так как именно постоянная составляющая требует большой мощности, то можно сделать вывод, что данный сигнал наиболее экономичен с точки зрения энергетики. К тому же отсутствие постоянной составляющей уменьшает такой отрицательный фактор, как дрейф нуля.

**Коды СМІ** – это сочетание ЧПИ и биимпульсных кодов. Также как в NRZ ЧПИ происходит изменение полярности каждого четного единичного импульса, но при этом еще происходит замена нуля одним биполярным импульсом, как в биполярных кодах. При этом последовательность, приведенная при рассмотрении биимпульсных кодов, будет такой, как показано на рисунке 4.27, и нулю соответствует биполярный импульс.

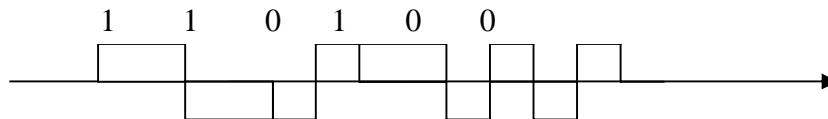


Рисунок 4.27 – Код СМІ

На практике часто применяют **МЧПИ коды** (модифицированный ЧПИ). Причиной их создания стала проблема выделения тактовой частоты при появлении в кодовой комбинации нескольких нулей подряд. В этих кодах вместо нулей добавляются определенные кодовые комбинации, которые удаляются после выделения тактовой частоты. Для того чтобы они легко удалялись, необходимо, чтобы они сбивали привычное чередование импульсов. Примером такого кода является код **НДВ-3**. Число 3 здесь указывает на то, что допускается количество нулей не больше трех.

Комбинация 0000 заменяется на комбинацию 000V или V00V, где «V» и «V» = +(-) 1. Рассмотрим правила составления этого кода:

1. Полярность «V» всегда противоположна полярности предыдущего импульса, а полярность «V» – совпадает.
2. Если число единиц в предыдущей пачке четное, то вводится V00V, если нечетное – 000V. Под пачкой понимается последовательность импульсов между двумя паузами с числом нулей больше трех.

Например, двоичная комбинация, показанная на рисунке 4.28:

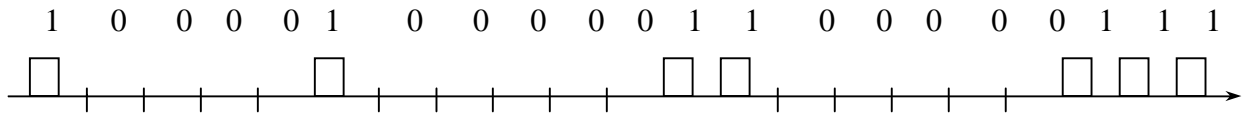


Рисунок 4.28 – Двоичная комбинация

После применения к ней описанного правила, код приобретет вид, показанный на рисунке 4.29:

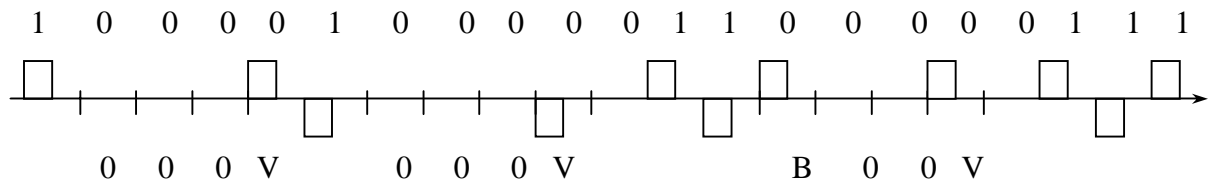


Рисунок 4.29 – МЧПИ код

#### 4.4 Синхронизация в ЦСП

В системах с ВРК принципиальным является четкое соблюдение временных соотношений импульсных последовательностей как на передающем, так и на приемном концах группового тракта. Под этим понимается:

- выполнение условий равенства тактовых частот принимаемого сигнала (передатчика) и тактового генератора приемника (частотный синхронизм)

$$f_{\text{т пер}} = f_{\text{т пр}} ;$$

- совпадение момента начала анализа каждого импульса принимаемой последовательности с моментом начала импульса тактового генератора приемника (фазовый синхронизм)

$$\varphi_{\text{т пер}} = \varphi_{\text{т пр}}$$

Эти два условия тактовой синхронизации иллюстрируются рисунками 4.30 и 4.31.

- четкое определение начала группового сигнала (начала цикла), что позволяет идентифицировать и выделить каждый канал из группы.

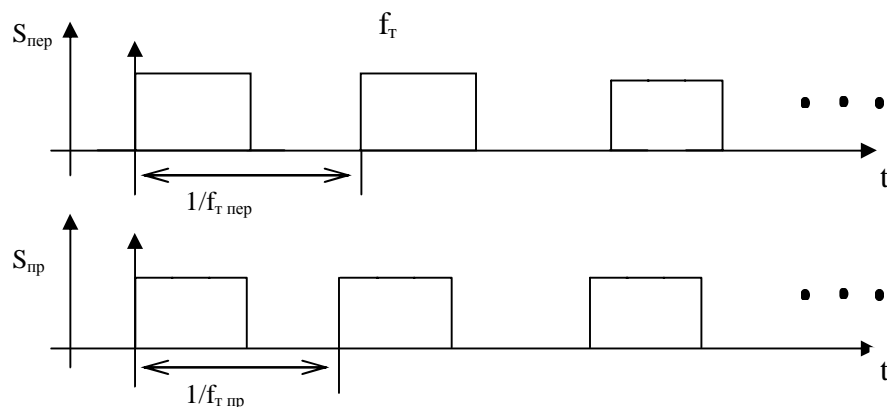


Рисунок 4.30 – Нарушение частотного синхронизма

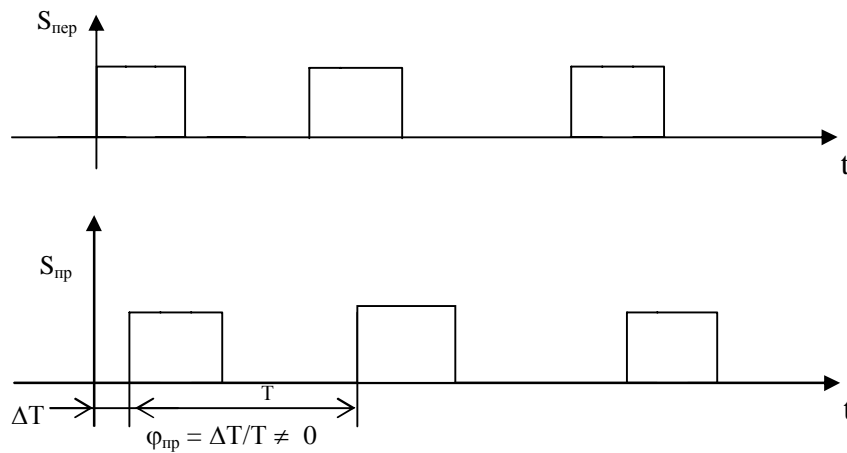


Рисунок 4.31 – Нарушение фазового синхронизма

Таким образом, при формировании группового сигнала и разработке аппаратуры ЦСП должны закладываться условия тактовой и цикловой синхронизации. На рисунке 4.32 приведена структура группового сигнала ЦСП. Здесь закодированный дискретный отсчет каждого канала, размером в 8 бит, организует каналный интервал КИ. За один цикл Ц передаются отсчеты из  $N$  каналов. Однако помимо циклов групповой сигнал содержит еще и  $M$  сверхциклов. Необходимость их введения объясняется следующим. Вместе с информационными байтами в групповом сигнале передаются и сигналы управления и взаимодействия (СУВ). Это сигналы вызова, набора номера и т.п. от каждого абонента. Передавать все  $N$  СУВ в каждом цикле нет необходимости, так как эти сигналы медленные по сравнению с информационными. Поэтому передачу СУВ организуют не со скоростью 8 кГц, а с меньшей скоростью так, что за время каждого цикла (125 мкс) передают отсчеты только двух из 30 каналов. Всего для передачи всех СУВ нужно  $M = (N/2)+1$  циклов. Один дополнительный цикл нужен для обозначения начала передачи СУВ. Длительность сверхцикла  $\tau_{\text{сц}} = M \tau_{\text{ц}}$ . Итак, для организации работы ЦСП необходимы тактовая (ТС), цикловая (ЦС) и сверхцикловая (СЦС) синхронизации.

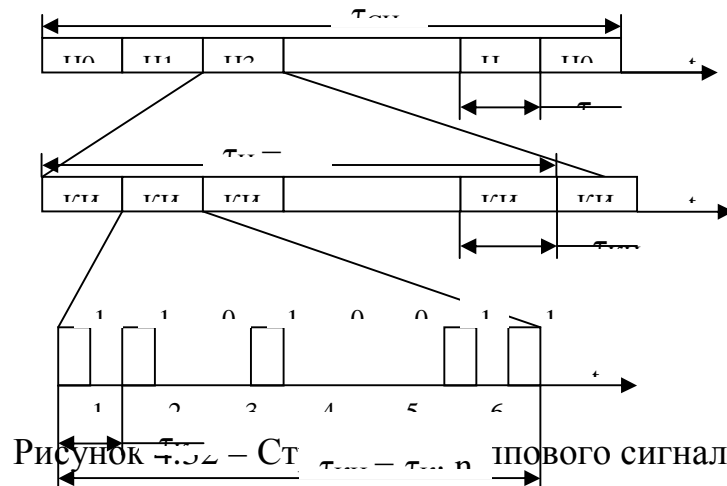


Рисунок 4.32 – Структура группового сигнала ЦСП

#### 4.4.1 Тактовая синхронизация

Основное назначение тактовой синхронизации – обеспечение темпа передачи и согласование скоростей передачи и приема информации. Нарушение тактовой синхронизации приводит к увеличению вероятности ошибок приема, срыву ЦС и СЦС, прекращению работы ЦСП.

Рассмотрим способы реализации ТС. Они делятся на две группы: 1 – резонансные; 2 – с использованием фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). В свою очередь резонансные устройства ТС бывают с передачей специальных сигналов и с использованием рабочих символов, т.е. импульсных последовательностей группового сигнала. Последний способ носит название – выделение тактовой частоты (ВТЧ). Он является наиболее распространенным в устройствах тактовой синхронизации.

Рассмотрим алгоритм и принцип действия резонансного устройства выделения тактовой частоты (УВТЧ). Как известно из раздела 4.3, в сигнале ЧПИ, или МЧПИ, который передается в тракте ЦСП, не содержится тактовая частота (рисунок 4.33). В однополярном двоичном сигнале такая дискретная частота есть. Таким образом, алгоритм ВТЧ представляет собой: ЧПИ (МЧПИ) → двоичный сигнал → фильтр → формирователь импульсов.

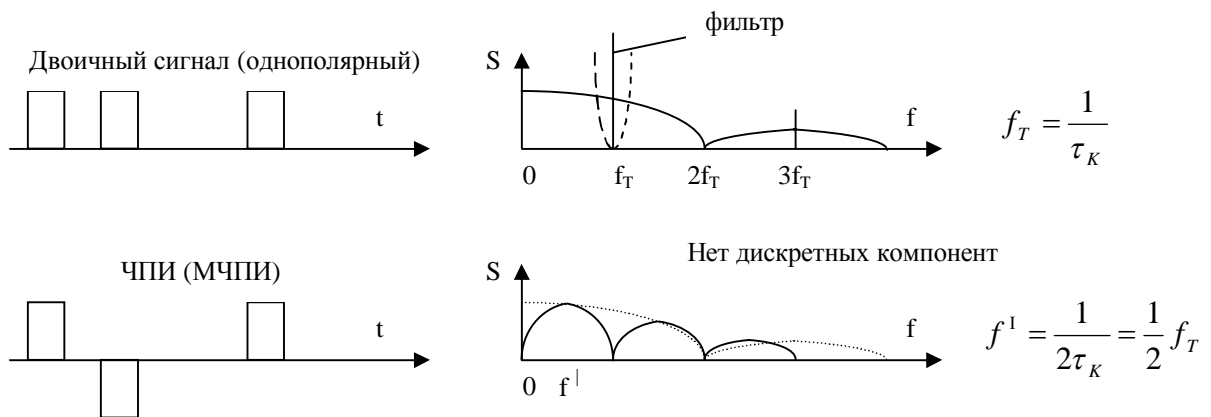


Рисунок 4.33 – Спектры цифровых сигналов

Блок-схема УВТЧ, работающего в соответствии с этим алгоритмом, представлена на рисунке 4.34. Здесь входной сигнал вначале усиливается усилителем, затем сигнал ЧПИ с помощью двухполупериодного выпрямителя преобразуется в однополярный цифровой сигнал. Тактовые импульсы получаются после фильтрации сигнала в резонансном фильтре, настроенном на тактовую частоту  $f_T$ , и прохождения гармонического сигнала через формирователь.

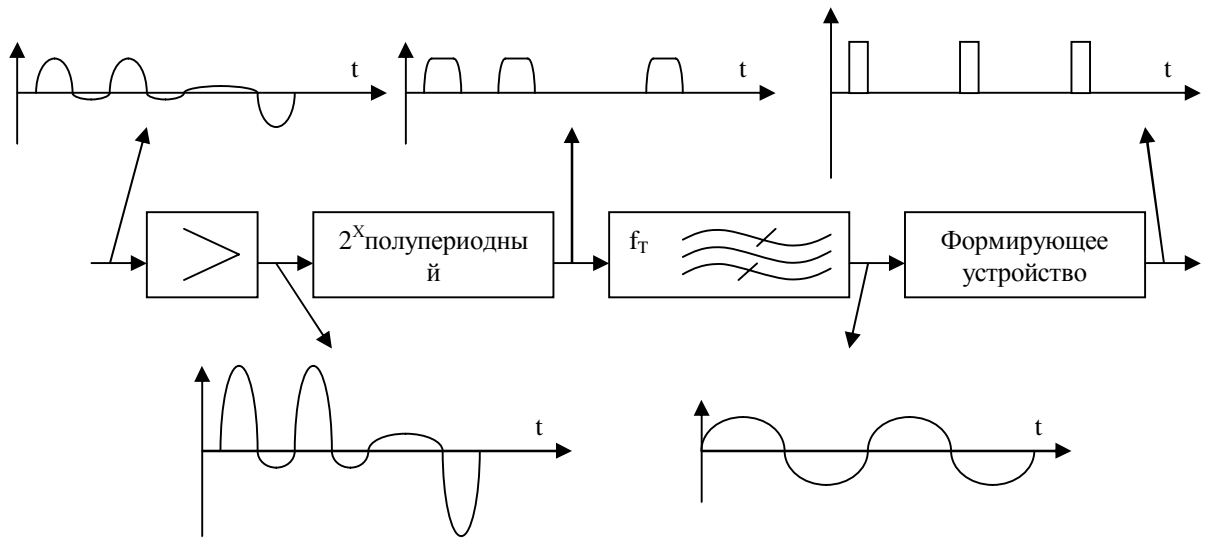


Рисунок 4.34 – Блок-схема резонансного УВТЧ

Резонансные УВТЧ широко применяются в оконечной приемной аппаратуре ЦСП, в регенераторах. Основным недостатком резонансных УВТЧ является нестабильность тактовой частоты. Причина этой нестабильности иллюстрируется рисунком 4.35.

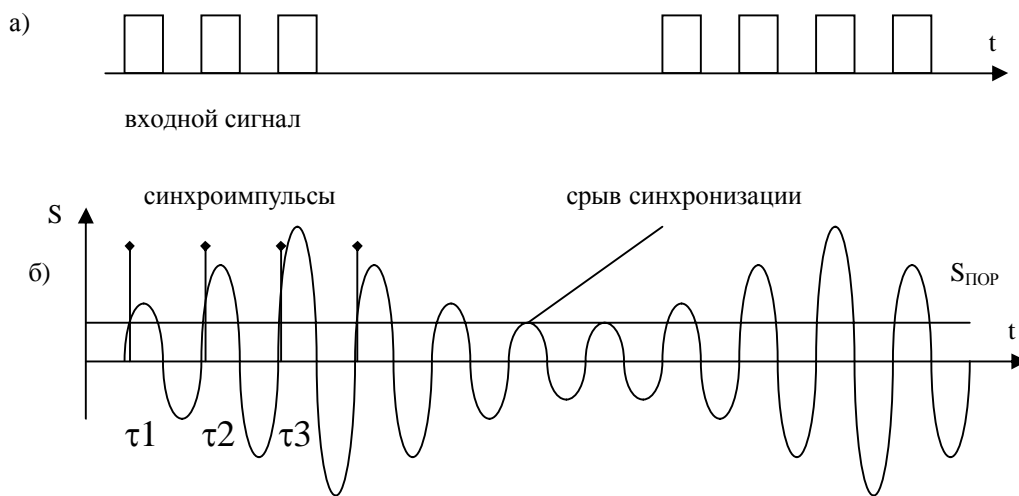


Рисунок 4.35 – Процесс выделения тактовой частоты

Здесь изображены сигналы на входе (а) и на выходе (б) фильтра. Моменты выделения тактовой частоты определяются пороговым напряжением  $S_{\text{ПОР}}$ . При нарастании и спаде амплитуды гармонического сигнала эти моменты  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  и др. не будут строго периодичны, что и приводит к нестабильности тактовой синхронизации и даже к ее срыву. Для устранения этой причины и применяют коды МЧПИ, HDB-3 и другие, которые не допускают в импульсных последовательностях большого количества нулей, следующих подряд.

Схема УВТЧ с ФАПЧ приведена на рисунке 4.36. Здесь тактовые импульсы вырабатываются управляемым генератором ГТЧ, который подстраивается с помощью фазового детектора под тактовую частоту входного сигнала.

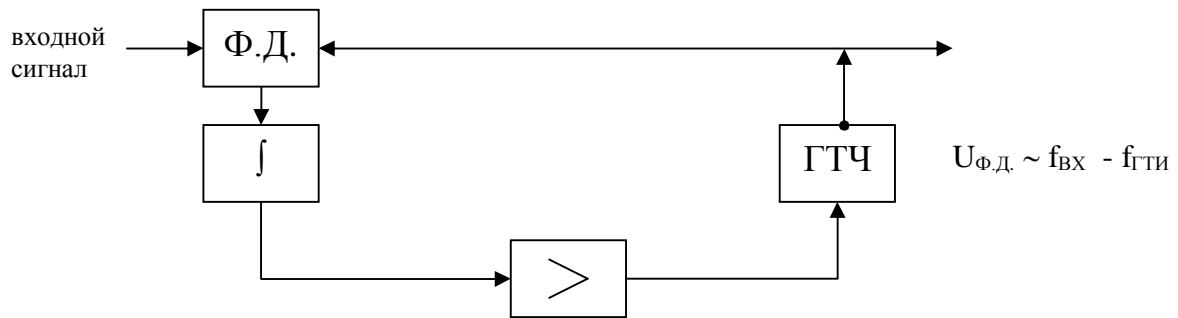


Рисунок 4.36– Блок-схема УВТЧ с ФАПЧ

Амплитуда импульсов на выходе фазового детектора пропорциональна разности частот ГТЧ и входного сигнала. Для сглаживания управляющего напряжения и плавной регулировки в устройстве применен интегратор.

Непосредственное воздействие управляющего устройства на ГТЧ обладает существенным недостатком – невысокой точностью синхронизации. Причина заключается в низкой стабильности частоты управляемого ГТЧ. Для устранения этого недостатка используют схему ФАПЧ без непосредственного воздействия управляющего устройства на частоту ГТЧ (рисунок 4.37).

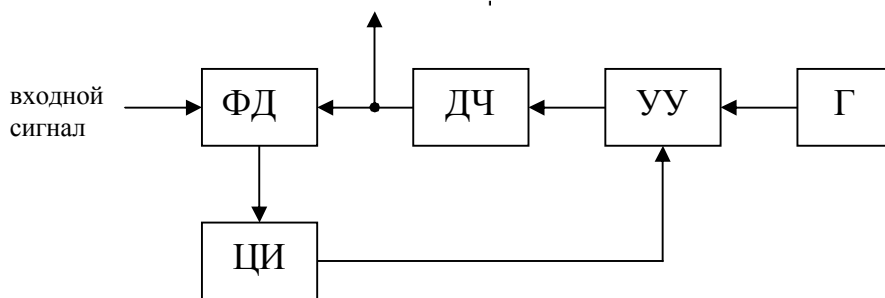


Рисунок 4.37 – Схема УВТЧ с ФАПЧ без непосредственного воздействия на генератор

Здесь частота генератора в  $m$  раз больше  $f_T$  и управление ею осуществляется с помощью устройства управления УУ, которое из импульсной последовательности исключает или добавляет к ней импульсы в соответствии с состоянием цифрового интегратора (реверсивного счетчика (ЦИ)). Делитель частоты ДЧ уравнивает частоты входного и опорного сигнала. При процедуре деления эффект нерегулярности следования импульсов от УУ за счет добавления или исключения сглаживается, а эффект регулирования тактовой частоты остается.

#### 4.4.2 Цикловая синхронизация

Цикловая синхронизация отвечает за распределение канальных интервалов, определяя их начало и последовательность. При нарушении ЦС начало цикла в приемнике смещается относительно истинного положения (рисунок 4.38).

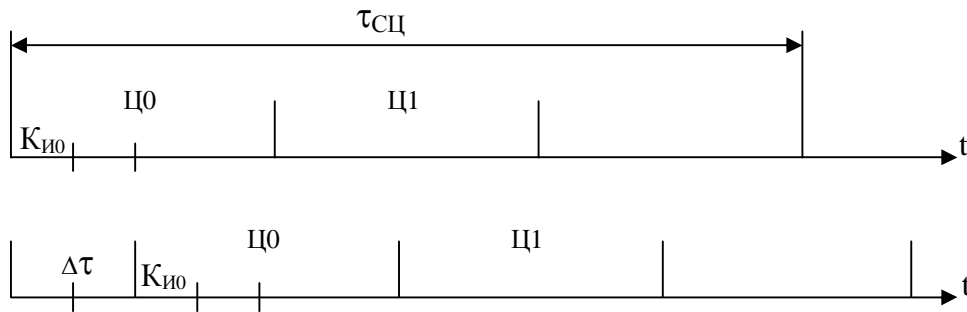


Рисунок 4.38 – Нарушение ЦС

В этом случае возможна потеря связи по всем каналам, переадресация абонентов, нарушение СЦС.

Для организации ЦС используется специальный многоразрядный синхросигнал, который помещается в начало цикла (рисунок 4.39)

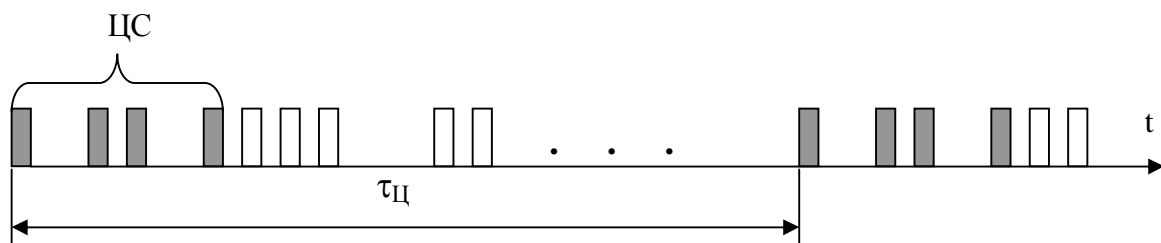


Рисунок 4.39 – Организация ЦС

Для надежной работы ЦС важную роль играют два его свойства:

- сложность кодовой комбинации;
- периодичность.

Первое из них обеспечивает высокую помехоустойчивость, так как случайное возникновение кодовой комбинации циклового синхросигнала в поле информационных символов хоть и возможно, но маловероятно. Но даже если такая ситуация случайно возникает, то возможность ложного срабатывания устраняется благодаря свойству периодичности. ЦС срабатывает только тогда, когда синхросигнал повторяется несколько раз с периодом, равным  $T_{Ц}$ .

Для формирования циклового синхросигнала применяются стандартные генераторы импульсных последовательностей. Приемник синхросигнала имеет более сложную структуру (рисунок 4.40). В его составе три узла: опознаватель, анализатор и решающее устройство.



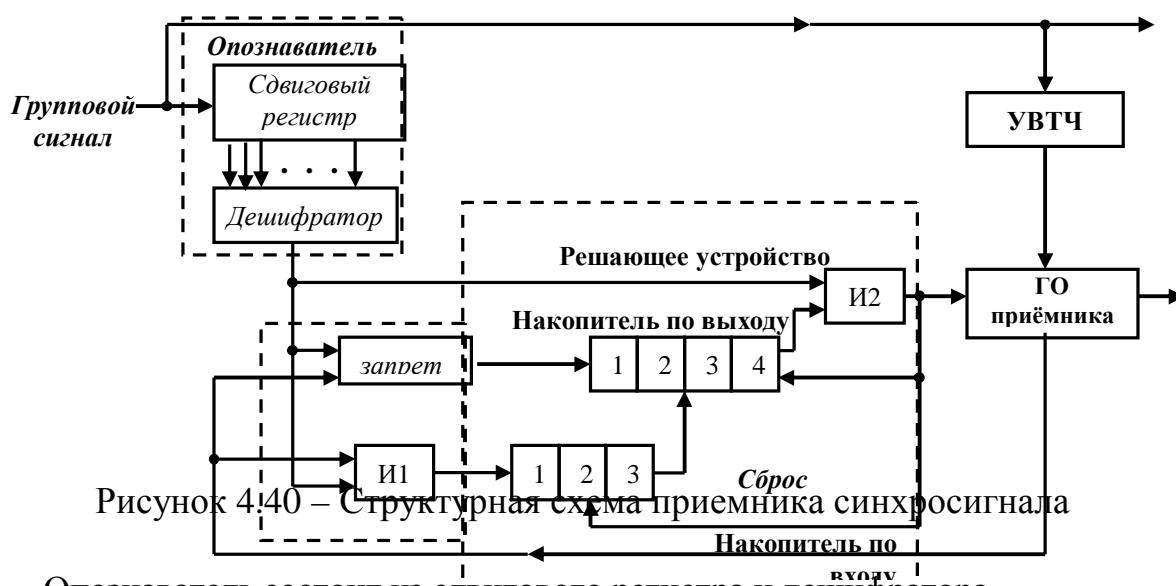


Рисунок 4.40 – Структурная схема приемника синхросигнала

Опознаватель состоит из сдвигового регистра и дешифратора.

Сдвиговой регистр постоянно заполняется символами группового сигнала. Когда комбинация ЦС (например 0011011) целиком наполняет разряды регистра, дешифратор срабатывает и его выходной сигнал поступает на анализатор и на решающее устройство.

Анализатор содержит два параллельных блока анализа:

- реакция на совпадение цикловых синхроимпульсов опознавателя и генераторного оборудования (ГО). Это – схема И1, которая выдает импульс на выходе, когда моменты прихода входных импульсов совпадают;
- реакция на несовпадение импульсов опознавателя и ГО – схема И2.

Решающее устройство содержит два накопителя: по входу в синхронизм (3–4 элемента накопления) и по выходу из синхронизма (4–6 элементов накопления) и схему совпадения И2. Решающее устройство в стандартной ситуации, когда цикловой синхронизм соблюдается, на выходе схемы И2 не выдает никакого сигнала. В этом случае работа ЦСП всецело определяется блоком генераторного оборудования. Этот блок запускается и синхронизируется от УВТЧ. На многочисленных выходах ГО выдаются импульсы распределения по разрядам внутри канального интервала, распределения по КИ и, наконец, импульсы распределения по циклам.

В стандартной ситуации установившегося циклового синхронизма цикловые импульсы ГО и синхроимпульсы опознавания совпадают во времени. На выходе схемы «И2» сигнала нет и на вход накопителя по выходу ничего не поступает. На выходе схемы «И1» подается импульс, который заполняет первый разряд накопителя. Так будет повторяться три раза, пока накопитель по входу не наполнится. При заполнении на выходе накопителя по входу появляется импульс, назначение которого сбросить (обнулить) все разряды накопителя по выходу. В нашем случае этот накопитель и так пуст. Таким образом, на выходе схемы И2 нет сигнала.

Рассмотрим теперь некоторые возможные ситуации нарушения ЦС (рисунок 4.41).

Предположим, что нарушена структура синхросигнала, тогда на выходе дешифратора импульс будет отсутствовать, однако ГО будет работать. Сбоя

синхронизации не будет. Если ситуация, приведенная на рисунке 4.4.12, а, повторится четыре раза и заполнится накопитель по выходу, то в этом случае на выходе И2 появится импульс, который приведет ГО в режим поиска (вхождение в синхронизм).

При сдвиге синхросигнала сбой будет периодическим и в этом случае генераторное оборудование будет осуществлять перестройку по задержке и вхождение в синхронизм.

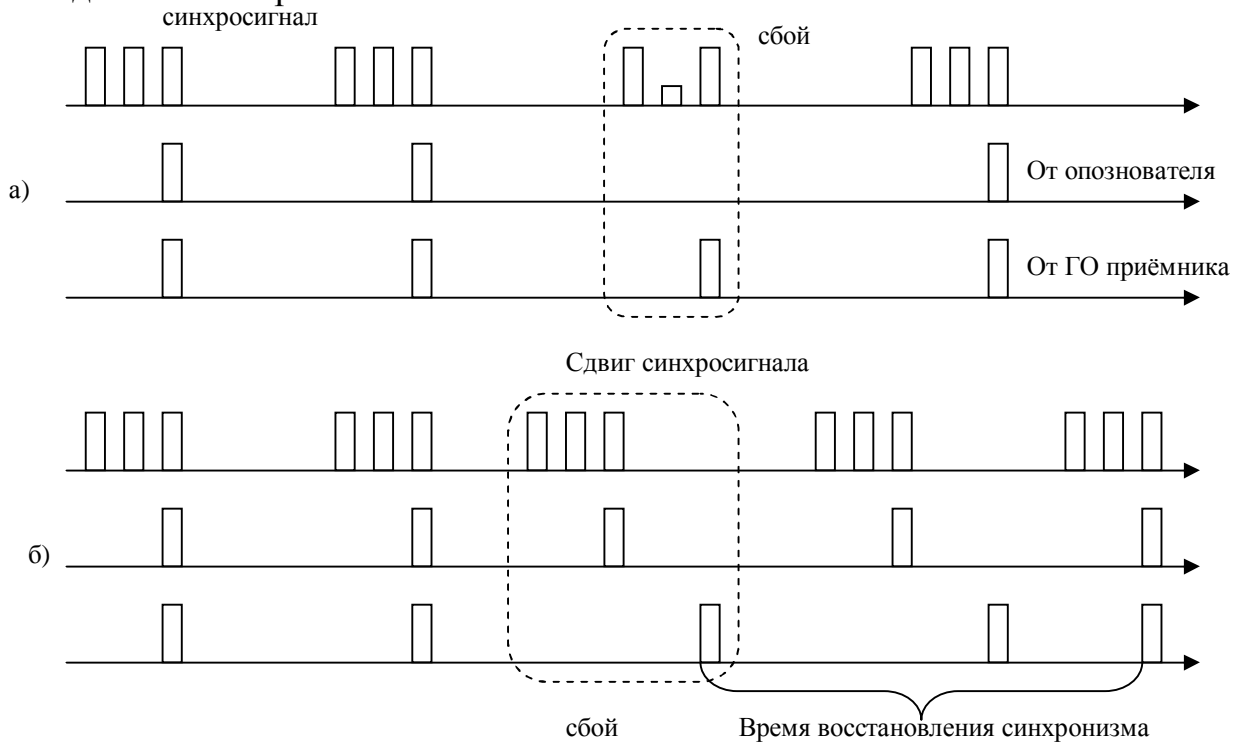


Рисунок 4.41 – Нарушение цикловой синхронизации:  
а) нарушен синхросигнал; б) сдвиг синхросигнала

## 4.5 Формирование группового сигнала

Рассмотрим сложившиеся к настоящему времени системы с временным группообразованием.

### 4.5.1 Межсимвольные искажения

Процесс объединения цифровых сигналов различных каналов, как уже отмечалось в разделе 4.1, заключается в размещении импульсов последовательно во времени друг за другом (рисунок 4.42). Идеальная последовательность (рисунок 4.42, а) на практике не реализуется, так как полоса пропускания системы передачи ограничена и форма импульса искажается (рисунок 4.42, б).

Эти искажения связаны с подавлением высокочастотных составляющих спектра (искажение первого рода) и подавлением низкочастотных составляющих (искажения второго рода). Искажения первого рода приводят к смещению импульса, увеличению его длительности и уменьшению амплитуды. Искажения второго рода вызывают спад плоской вершины и появление длинных

«хвостов», следующих за основным импульсом. Наибольшую неприятность при формировании и объединении цифровых потоков представляет расширение импульса и появление «хвостов», поскольку эти процессы приводят к возникновению межсимвольных искажений или «межсимвольной интерференции», когда сигнал из одного временного интервала попадает в соседний и может привести там к смене состояния ( $0 \rightarrow 1$  или  $1 \rightarrow 0$ ).

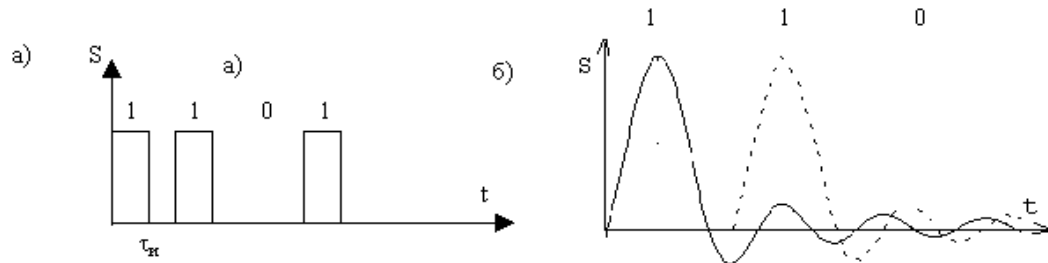


Рис. 4.42 – Цифровой сигнал при объединении каналов

Для подавления межсимвольных искажений разработано много способов, наиболее распространенными из которых являются:

1. Применение сигналов без постоянной составляющей (ЧПИ, HDB-3, биимпульсные коды и др.). В этом случае происходит существенная компенсация низкочастотных искажений (рисунок 4.43).

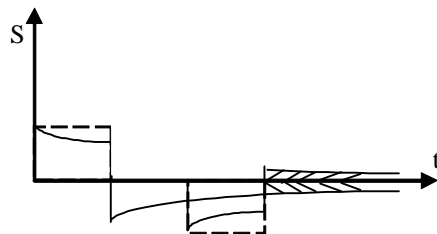


Рисунок 4.43 – Подавление искажений второго рода в биполярных сигналах

2. Фильтрация сигнала с целью подавления боковых лепестков импульсной характеристики.

Поскольку полоса пропускания системы передачи  $\Delta f$  ограничена, ее импульсная характеристика будет иметь вид (рисунок 4.44). Ширина полосы пропускания главного лепестка и уровень боковых лепестков функции  $g(t)$  зависят от формы амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра.

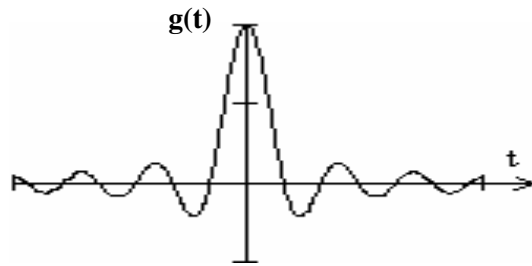


Рисунок 4.44 – Импульсная характеристика фильтра с ограниченной полосой пропускания

Для идеального фильтра с прямоугольной АЧХ импульсная характеристика будет определяться преобразованием Фурье от  $K(\omega)$  (рисунок 4.45).

$$|K(\omega)| = \begin{cases} K_0 & |\omega| \leq \omega_B \\ 0 & |\omega| > \omega_B \end{cases},$$

$$y(t) = \frac{\hat{E}_0 \omega_B}{\pi} \frac{\sin \omega_B t}{\omega_B t}.$$

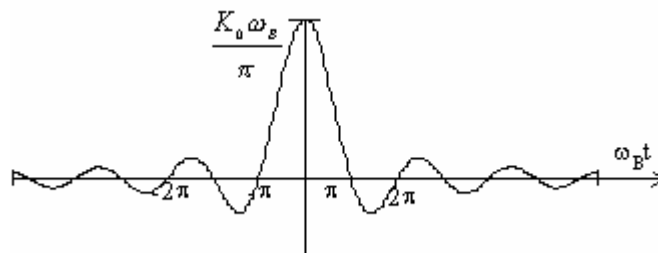


Рисунок 4.45 – Импульсная характеристика идеального фильтра

Ширина главного лепестка по нулевому уровню будет равна:

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega_B} = \frac{1}{f_B},$$

а отношение уровня первого бокового лепестка к главному составляет 0.213.

С целью снижения уровня боковых лепестков функции  $g(t)$ , скаты частотной характеристики делают пологими. Так, например, для фильтров типа Хемминга

$$K(\omega) = \begin{cases} K_0 (0,54) + 0,46 \cos \frac{\pi}{2} \frac{\omega}{\omega_B} & |\omega| \leq \omega_B; \\ 0 & |\omega| > \omega_B. \end{cases}$$

Уровень первого бокового лепестка  $g(t)$  снижается до 0.006.

### 3. Применение фильтров Найквиста.

Эти фильтры имеют АЧХ типа

$$K(\omega) = \begin{cases} 1 & 0 \leq \omega \leq (1-\alpha) \omega_B; \\ \cos^2 \left[ \frac{\pi}{4\alpha\omega_B} (\omega - (1-\alpha)\omega_B) \right] & (1-\alpha) \omega_B \leq \omega \leq (1+\alpha) \omega_B; \\ 0 & (1+\alpha) \omega_B < \omega. \end{cases}$$

Характеристики фильтров Найквиста для разных значений параметра  $\alpha$ , определяющего крутизну скатов АЧХ, приведены на рисунке 4.46.

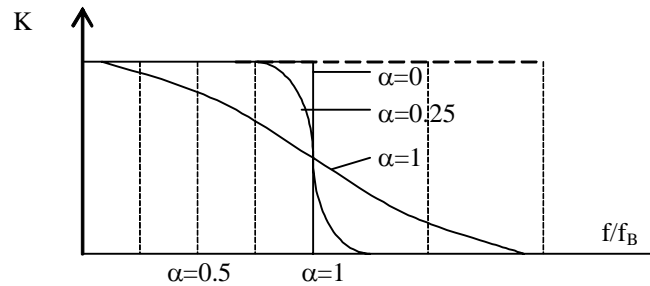


Рисунок 4.46 – АЧХ фильтров Найквиста

Импульсная характеристика фильтра

$$g(t) = \frac{\sin \omega_B t}{\omega_B t} \left[ \frac{\cos \alpha \omega_B t}{1 - \left( \frac{2\alpha \omega_B t}{\pi} \right)^2} \right]$$

имеет вид (рисунок 4.47), где  $\tau = \frac{\pi}{\omega_B}$ , и определяет частоту взятия отсчетов.

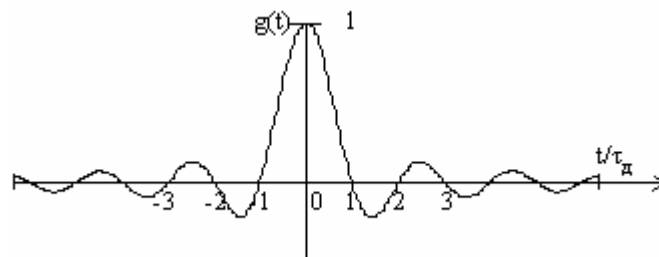


Рисунок 4.47– Импульсная характеристика идеального фильтра Найквиста

Импульсная характеристика имеет следующие особенности:

- 1) боковые лепестки быстро затухают;
- 2) в моменты  $t=n\tau_d$  значения  $g(t)$  равны нулю.

Работа цифровых систем передачи с фильтром Найквиста организуется так. Дискретные отсчеты в виде коротких импульсов с интервалом  $\tau_d$  подаются

на фильтр, на выходе которого появляются отклики  $g(t-k\tau_d)$  (рисунок 4.48, а). Сумма этих откликов (рисунок 4.48, б) представляет собой сложный по форме аналоговый сигнал.

Особенностью суммарного сигнала является то, что в моменты  $t=k\tau_d$  его значения соответствуют значениям передаваемых отсчетов. Поэтому суммарный сигнал модулируется, например, с помощью однополосной амплитудной модуляции, и передается по каналу связи. На приемном конце после детектирования выделяются выборки в моменты времени  $t=k\tau_d$ . Разумеется, что работа такой ЦСП существенно зависит от точности синхронизации и влияния шумов и помех.

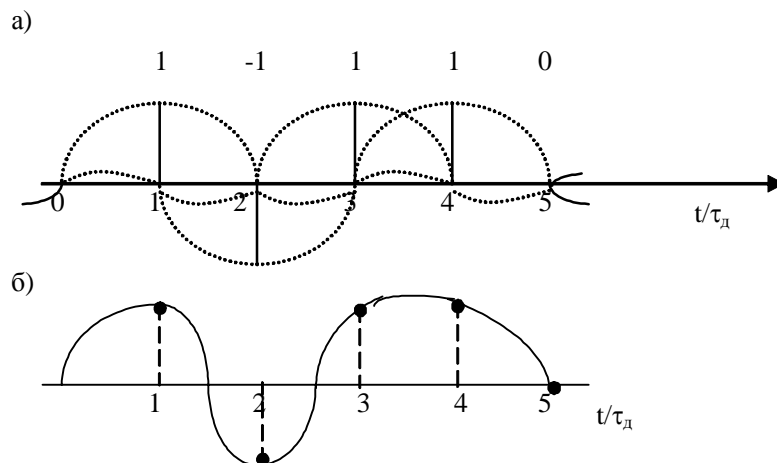


Рисунок 4.48 – Работа ЦСП с фильтром Найквиста

В современных ЦСП применяются все эти методы, хотя в проводных системах традиционно используются биполярные сигналы, а в системах с радиоканалами – комбинации всех, поскольку эффективность использования частотного диапазона здесь стоит особенно остро.

#### 4.5.2 Первичный цифровой сигнал (ИКМ-30)

В ЦСП групповой сигнал формируется в виде цикла. Длительность цикла  $\tau_c$  равна времени дискретизации  $\tau_d$ , которое равно 125 мкс. В пределах цикла передается информация от  $N$  каналов и служебная информация (сигналы синхронизации, сигнализации и др.). Число  $N$  может быть различным. Так, в системе ИКМ-30/32 (стандарт ITU-T G.703) 30 информационных и 2 служебных канала, а в системе ISDN BRI  $N=3$ , где два информационных канала 64 кб/с и один служебный 16 кб/с.

Основным цифровым каналом (ОЦК) является канал со скоростью передачи 64 кб/с.

Информация в этом канале в виде одного байта (восемь бит) передается за время  $\frac{\tau_c}{N}$ . Поскольку для надежного выделения тактовой частоты длитель-

ность импульса  $\tau_{\text{и}}$  должна быть в 2 раза меньше длительности битового интервала  $\tau_{\text{б}}$ , то  $\tau_{\text{и}} = \frac{\tau_{\text{ц}}}{2 \cdot 8 \cdot N}$ .

$$\text{Для системы ИКМ-30 } \tau_{\text{и}} = \frac{125 \text{ мкс}}{2 \cdot 8 \cdot 32} = 0.24 \text{ мкс}.$$

Рассмотрим систему ИКМ-30 подробнее.

Временной план (или как говорят временной спектр) ЦСП ИКМ-30 приведен на рисунке 4.5.8. Здесь цикл передачи содержит 32 канальных интервала (КИ), в которых передается информация абонентов (КИ<sub>1</sub>–КИ<sub>15</sub>; КИ<sub>17</sub>–КИ<sub>31</sub>) и служебная информация (КИ<sub>0</sub> и КИ<sub>16</sub>). Назначение битов в байте канального интервала определяется номером позиции бита  $P_n$  ( $n=1-8$ ). Для абонентских каналов на позициях  $P_n$  передается 0 или 1 в зависимости от содержания информации, а кодовая комбинация, содержащаяся в байте, определяет значение отсчета в данном канале в данный момент времени.

Основное назначение КИ<sub>16</sub> – передача сигналов управления и взаимодействия (СУВ) или сигнализации. К ним относятся сигналы: «Запрос», «Ответ», «Набор номера», «Занято» и др. Длительность этих сигналов значительно больше длительности цикла. Поэтому их не обязательно передавать в каждом цикле и по этой причине вводятся сверхциклы, которые объединяют несколько циклов. В системе ИКМ-30 в одном цикле передаются СУВ, только для двух каналов с номерами  $i$  и  $i+15$ , где  $i=1 \div 15$ . Для передачи отводится по четыре позиции  $P_1-P_4$  и  $P_5-P_8$ , однако на практике используется только две  $P_1-P_2$  и  $P_5-P_6$ , а остальные остаются для свободного использования.

Примеры заполнения битовых позиций для некоторых сигналов при передаче от абонента к АТС приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Сигналы управления и взаимодействия

N		Сигнал		Применение
		$P_1(P_5)$	$P_2(P_6)$	
1	Занятие	1	0	
2	Набор номера			} Время передачи импульса 50мс Длительность интервала 700мс
	Импульс	0	0	
	Пауза	1	0	
	Межцифровой интервал	1	0	
3	Разъединение	1	1	

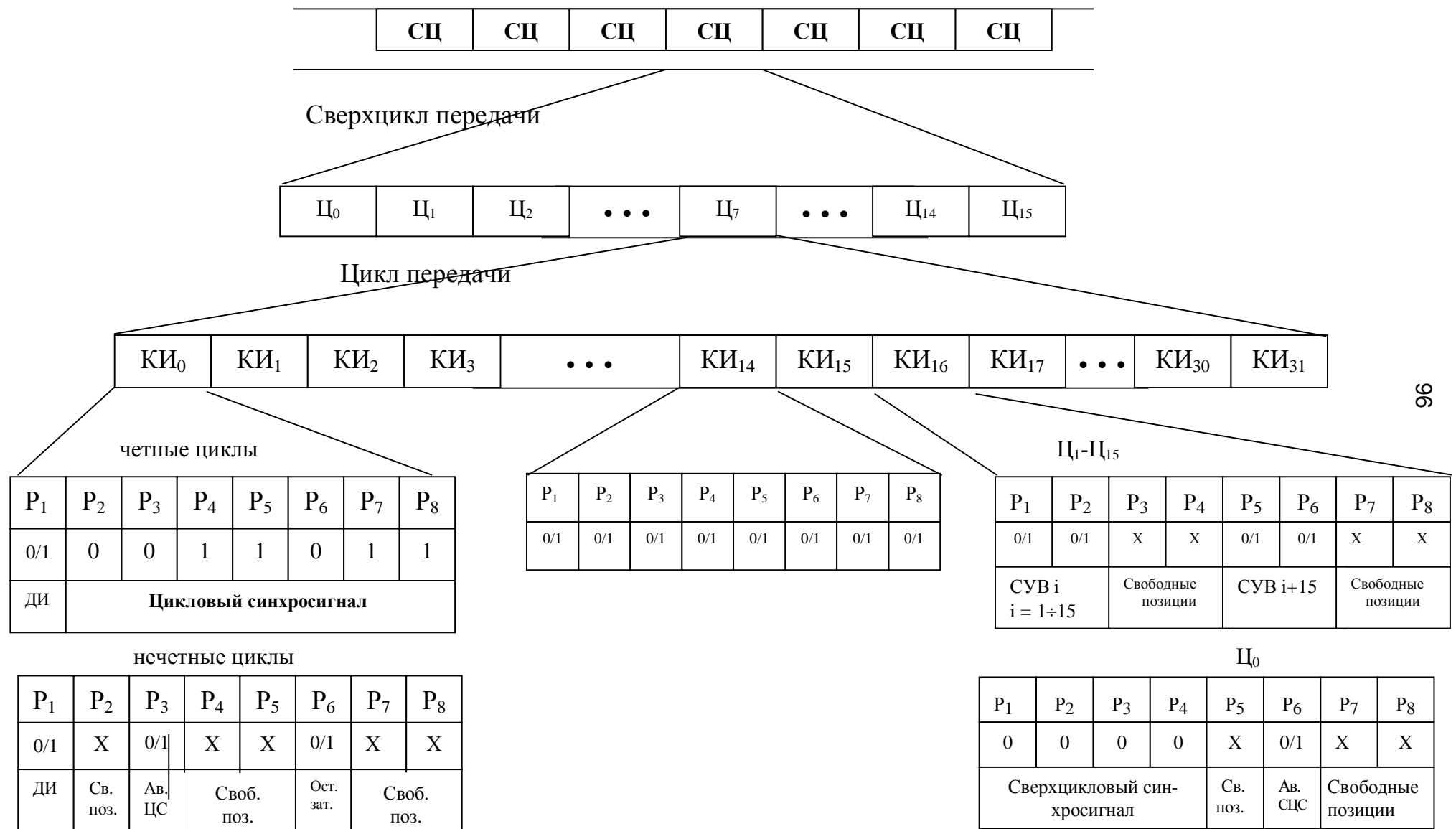


Рисунок 4.49 – Временной спектр ИКМ-30



Поскольку длительность сверхцикла

$$\tau_{\text{сц}} = 16 \cdot \tau_{\text{ц}} = 16 \cdot 125 \text{ мкс} = 2 \text{ мс},$$

то время передачи каждого импульса 50 мс вполне достаточно для надежного набора номера.

Так как циклы должны быть пронумерованы и иметь периодичность передачи и приема, в первом цикле с номером Ц<sub>0</sub> передается сигнал сверхцикловой синхронизации (СЦС), сформированный четырьмя нулями на позициях Р<sub>1</sub>–Р<sub>4</sub>. В случае потери сверхцикловой синхронизации на позиции Р<sub>6</sub> передается сигнал «Авария СЦС». Остальные три разряда свободны. Отсюда можно сделать вывод, что число циклов в сверхцикле

$$M = N/2 + 1,$$

где М – число информационных каналов.

В канальном интервале КИ<sub>0</sub> на позициях Р<sub>2</sub>–Р<sub>8</sub> передается цикловый синхросигнал 8 раз за сверхцикл только в четных циклах. Позиция Р<sub>1</sub> предназначена для передачи дискретной информации для служебного или коммерческого пользования.

В нечетных циклах в КИ<sub>0</sub> на позиции Р<sub>3</sub> передается сигнал аварии цикловой синхронизации, а на позиции Р<sub>6</sub> – сигнал регистрирующий увеличение коэффициента передачи в ЦСП, близкий к порогу самовозбуждения и предписывающий ввести остаточное затухание. Остальные позиции в КИ<sub>0</sub> свободны.

Свободные позиции были отведены для передачи дополнительной служебной информации производителями оборудования и операторами связи по своему усмотрению. Такой информацией может быть:

- потеря тактовой синхронизации;
- потеря цифрового сигнала;
- низкая помехоустойчивость (коэффициент ошибок больше пороговой величины  $P_{\text{ош}} > 10^{-3}$ ,  $P_{\text{ош}} > 10^{-5}$ ) и другая.

Система ИКМ-30 может быть использована не только для передачи телефонных сигналов, но и для передачи данных, когда часть канальных интервалов отводится для этих целей. В предельном случае во всех канальных интервалах кроме КИ<sub>0</sub> передается дискретная информация с максимальной скоростью 1984 кб/с.

#### 4.6 Шумы и помехи в цифровых системах передачи

В ЦСП на передачу информации влияют те же виды шумов и помех, что и в аналоговых системах (см. раздел 3): тепловые и дробовые шумы, переходные помехи в многопарных электрических кабелях, атмосферные и промышленные помехи. Специфика ЦСП заключается в том, что роль нелинейных помех, очень существенных в АСП, здесь практически сводится к нулю, так как при временном разделении каналов одновременное существование сигналов различных частот исключается.

Вместе с тем в ЦСП появляются новые виды шумов и помех, которые необходимо учитывать. К таким дополнительным шумам относятся шумы дискретизации, шумы квантования, шумы незагруженного канала, шумы ограничения и дополнительные переходные помехи, связанные с искажением формы импульсов принимаемых сигналов.

В результате дискретизации мы получаем сигнал с АИМ. Система с АИМ преобразуется в систему с ИКМ, если добавить АЦП на передающей стороне и ЦАП на приемной. Процессы дискретизации и квантования изображены на рисунках 4.50 а, б.

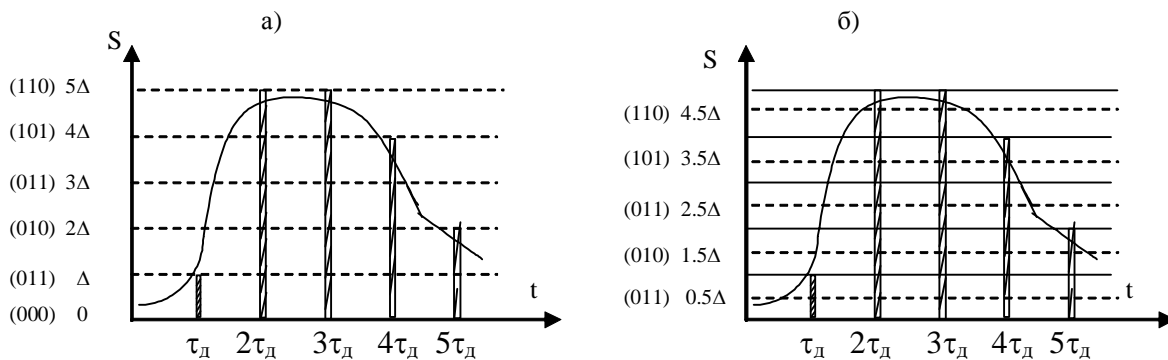


Рисунок 4.50 – Дискретизация и квантование аналогового сигнала

На рисунке 4.50, а рабочая точка характеристики (первый выходной отсчет – 000) совпадает с нулевым значением входного сигнала. Максимальная погрешность квантования равна  $\Delta_0$ .

На рисунке 4.50, б первый отсчет 001 принимается при значениях входного сигнала, колеблющихся в диапазоне  $0 - \Delta$  вокруг значения  $0,5\Delta$ . Аналогично все последующие отсчеты привязаны к точкам  $1.5\Delta$ ,  $2.5\Delta$  и т.д. Максимальная погрешность квантования здесь равна  $\pm\Delta/2$ .

#### 4.6.1 Шумы дискретизации

Если при дискретизации и передаче расстояния между отсчетами становятся не одинаковыми, то будут появляться шумы дискретизации, т.е. шумы неравномерности временных отсчетов:

$$\tau_d + \Delta\tau_i. \quad (4.5)$$

Величина  $\Delta\tau_i$  на каждом шаге есть случайная величина.

Следствием этого будет изменение формы принимаемого сигнала, потому что выходные отсчеты будут смещены во времени по отношению к исходным. Приведенный ниже рисунок 4.51 иллюстрирует этот процесс изменения сигнала.

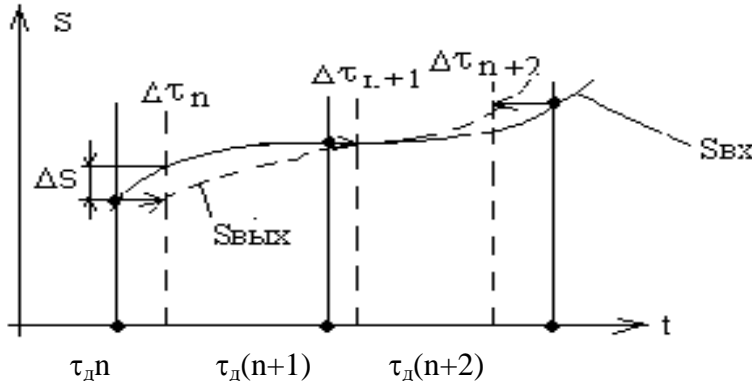


Рисунок 4.51 – Изменение формы принимаемого сигнала в связи со случайным отклонением  $\Delta\tau_i$

Основные причины неустойчивости  $\tau_d$ :

- 1) неустойчивость частоты задающего тактового генератора;
- 2) случайные изменения времени задержки в тракте передачи (линиях связи, регенераторах и т.п.). Это явление называют джиттером, или фазовым дрожанием, или фазовым шумом.

Поскольку эти два источника фазового шума независимы, то два случайных процесса не коррелированы и их влияние можно оценить с помощью энергетических характеристик: дисперсии и мощности шума.

Если отклонение  $\tau_d$  за счет неустойчивости тактового генератора обозначить через  $\Delta\tau_{n\Gamma}$ , а за счет фазового дрожания –  $\Delta\tau_{n\Phi}$ , то при условии  $\Delta\tau_n \ll \tau_d$  мощность шумов дискретизации можно записать через мощность шумов неустойчивости генератора  $P_{ш\Gamma}$  и мощности шумов фазового дрожания  $P_{ш\Phi}$ :

$$P_{ш\delta} = P_{ш\Gamma} + P_{ш\Phi}. \quad (4.7)$$

Поскольку мощность шума случайного процесса есть дисперсия, то для левой части можно записать:

$$P_{ш\delta} = \frac{\overline{\Delta S^2}}{S^2}, \quad (4.8)$$

где  $\overline{\Delta S^2}$  – дисперсия отклонения выходного сигнала  $S$  от входного.

Для правой части

$$P_{ш\Gamma} + P_{ш\Phi} = \frac{\overline{\Delta\tau_{n\Gamma}^2}}{\tau_d^2} + \frac{\overline{\Delta\tau_{n\Phi}^2}}{\tau_d^2} = a^2 + b^2. \quad (4.9)$$

Приравнявая (4.6.3) и (4.6.4), получим уравнение для расчета шумов дискретизации

$$\overline{\Delta S^2} = \pi^2 S^2 (a^2 + b^2), \quad (4.10)$$

где множитель  $\pi^2$  появился при строгом статистическом расчете.

Из (4.6.5) находится выражение для защищенности от шумов дискретизации

$$A_{ш\partial} \geq 10 \lg[\pi^2 (a^2 + b^2)]^{-1}. \quad (4.11)$$

Зная  $a$  и  $b$ , можно найти мощность шумов дискретизации и наоборот, задаваясь защищенностью  $A_{ш\partial}$ , можно найти требования к джиттеру и требования к тактовой стабильности генератора.

Так, для основного цифрового канала ( $V = 64$  кбит/с,  $\tau_d = 125$  мкс) можно оценить  $\Delta\tau_n \leq 810$  нс при  $A_{ш\partial}$  в канале = 34 дБ.

#### 4.6.2 Шумы квантования

Природа шумов квантования связана с округлением отсчета сигнала до значения ближайшего уровня (рисунок 4.50).

Последовательные ошибки квантования в ИКМ-кодере в общем случае предполагаются распределенными по случайному закону и не коррелированными друг с другом. Таким образом, совокупный эффект ошибок квантования в системах с ИКМ можно рассматривать как аддитивные шумы, имеющие субъективное воздействие, которое аналогично воздействию шума с ограниченной полосой. На рисунке 4.52 представлена зависимость ошибок квантования от амплитуды сигнала для кодера с равномерными шагами квантования и с характеристикой, приведенной на рисунке 4.50, б.

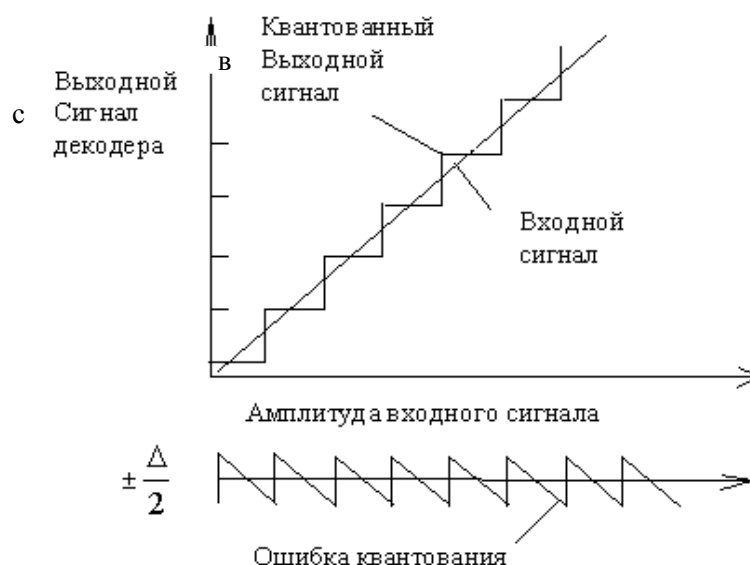


Рис. 4.52 – Зависимость ошибок квантования от амплитуды отсчета

Ошибки, или шум, квантования, возникающие при преобразовании аналогового сигнала в цифровую форму, обычно выражаются в виде средней мощности шума по отношению к средней мощности сигнала.

Для равномерного квантования отношение сигнал-шум определяется формулами 4.3 и 4.4.

При определении среднего значения шума квантования будем руководствоваться следующими положениями:

- ошибка квантования ограничена по амплитуде значением  $\Delta/2$ ,  $\Delta$  – это шаг квантования (декодированные выходные дискреты располагаются точно по середине шага квантования);
- можно предположить, что значения дискретов с равной вероятностью могут попадать в любую точку в пределах шага квантования (предполагается равномерная плотность вероятности, равная  $1/\Delta$ );
- предполагается, что амплитуды сигнала ограничены рабочим диапазоном кодера. Если значение дискрета превышает границу наивысшего шага квантования, то возникают искажения, вызванные перегрузкой.

При этом мощность шума квантования:

$$P_{\text{ш.кв.}} = \frac{\Delta^2}{12}. \quad (4.12)$$

При расчете отношений сигнал-шум квантования обычно сопоставляют нефигьтрованный сигнал на выходе декодера с нефигьтрованными ошибками квантования. На практике фильтр на выходе кодера уменьшает уровень мощности и сигнала, и шума. Мощность шума уменьшается в большей степени, чем мощность сигнала, поскольку дискреты шума имеют более широкий спектр, чем дискреты речи. Вследствие этого отношение сигнал-шум квантования при наличии фильтра обычно выше значений, рассчитываемых по формулам на 1 ... 2 дБ.

Высококачественные ИКМ – кодеры создают шум квантования, который равномерно распределен в диапазоне частот канала тональной частоты и не зависит от кодируемого сигнала. В этом случае отношение сигнал-шум квантования является хорошей мерой качества ИКМ – преобразования.

При неравномерном квантования расчет шумов квантования следует проводить, исходя из того, что шаг квантования в каждом сегменте разный. Кроме того, необходимо учитывать вероятность попадания значения входного сигнала в заданный сегмент.

$$P_{\hat{e}} = \sum_i \frac{\Delta_i^2}{12} P(S \in \delta_i) \quad (4.13)$$

Вероятности  $P(S \in \delta_i)$  зависят от типа входного трафика. Так для телефонных сигналов эта функция описывается выражением 4.14 и представлена на рисунке 4.53. Некоторые результаты расчета по этим формулам будут представлены в конце раздела.

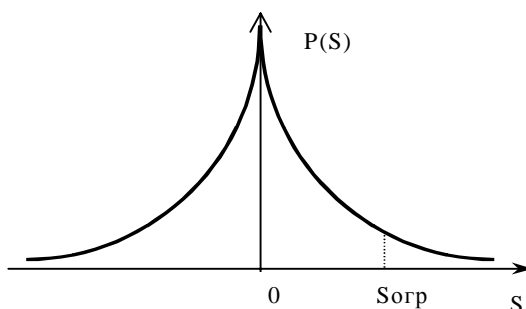


Рисунок 4.53 – Плотность распределения  $p(S_{BX})$ 

$$P(S) = \frac{\alpha}{2} \cdot e^{-\alpha \cdot |S|}, \quad (4.14)$$

где  $\alpha = \frac{\sqrt[3]{2}}{S_d}$ .

### 4.6.3 Шумы незагруженного канала

Анализ выражения (4.3) показывает, что при заданном  $\Delta$  отношение сигнал-шум мало для малых значений сигналов. Как показано на рисунке 4.54, шумы равны значениям сигнала, если значения его дискретных отсчетов приходятся на первый шаг квантования, а характеристика квантования имеет рабочую точку на границе между шагами квантования.

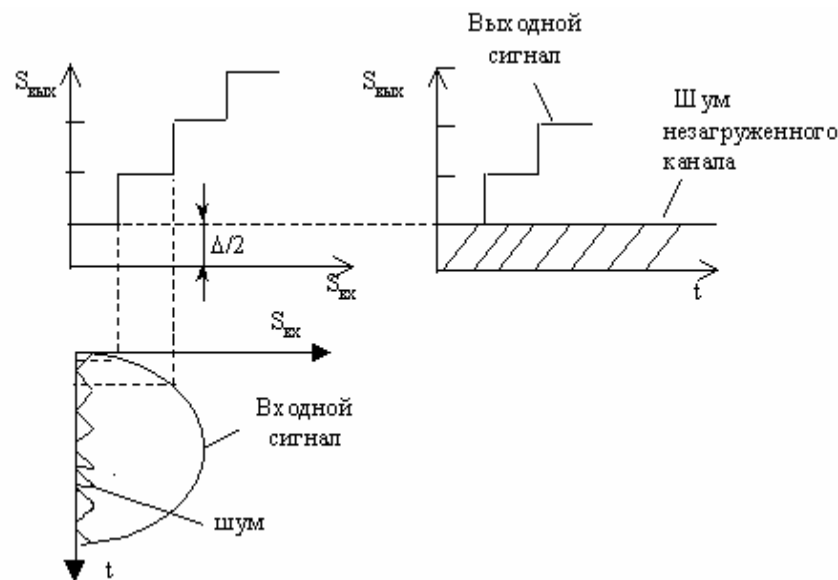


Рисунок 4.54 – Шумы незагруженного канала

Этот эффект особенно неприятен во время пауз речи и носит название шумов незагруженного канала. При молчащем абоненте существуют аналоговые шумы, которые не превышают нулевой уровень  $\Delta/2$ , но создают шумы на выходе. На рисунке 4.55 изображен один из методов минимизации шумов незагруженного канала в системах с ИКМ путем сдвига характеристики квантования от начала координат. В этом случае все значения дискретов, приходящиеся на центральный шаг квантования, постоянно декодируются как нулевой сигнал на выходе.

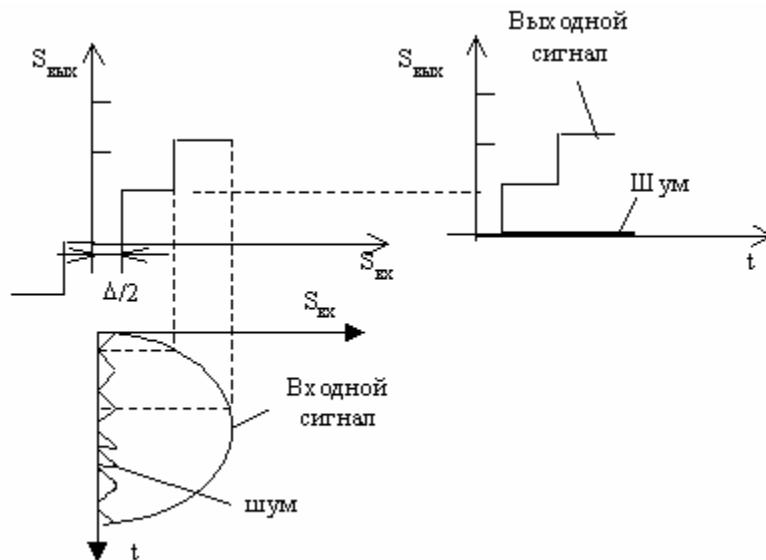


Рисунок 4.55 – Подавление шумов незагруженного канала

Первая характеристика квантования не может дать на выходе нулевого сигнала. Вторая характеристика очевидно более предпочтительна, поскольку в этом случае очень малые сигналы образуют на выходе сигнал с нулевым значением. Однако, если амплитуда сигнала сопоставима с размером шага квантования или на входе кодера существует смещение постоянного тока, шумы незагруженного канала могут представлять проблему также и при установке рабочей точки кодера посередине шага квантования.

#### 4.6.4 Шумы ограничения

При кодировании обычно искусственно ограничивают уровень выходного сигнала. Характеристика квантователя с ограниченным  $S_{\text{вых}}$  приведена на рисунке 4.56.

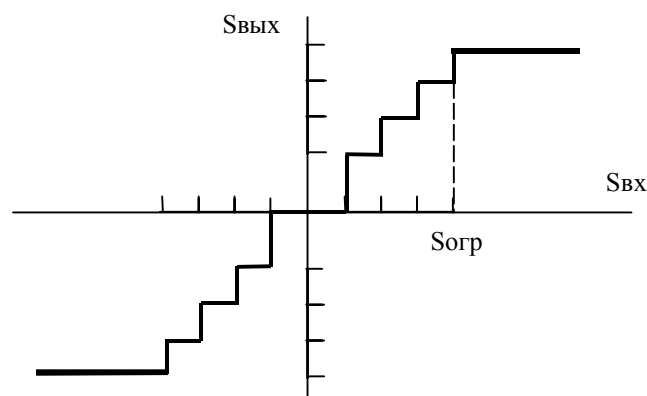


Рисунок 4.56 – Характеристика квантователя с ограниченным  $S_{\text{вых}}$

Если  $S_{\text{вх}} > S_{\text{огр}}$ , то значение сигнала на выходе будет  $S_{\text{огр}}$ . Возникающие искажения будут расцениваться как воздействие помехи. Вероятность такого со-

бытия мала, но не учитывать ее нельзя. Для расчета мощности помехи воспользуемся методикой вычисления мощности случайного процесса.

$$P_{\text{огр}} = 2 \cdot \int_{S_{\text{огр}}}^{\infty} (S_{\text{огр}} - S_{\text{вх}})^2 \cdot P(S_{\text{вх}}) dS_{\text{вх}}. \quad (4.15)$$

На рисунке 4.57 приведены результаты расчета защищенности  $A_z$  от шумов квантования и шумов ограничения как функции уровня действующего значения входного сигнала  $U_d$  к его максимальному значению  $U_m$ . Закон компрессии А, число сегментов – 8, а число шагов в каждом сегменте – 16. Функция 1 соответствует речевому сигналу, а 2 – тестовому синусоидальному с частотой 1000 Гц.

Как видно обеспечивается постоянное отношение сигнал-шум  $A_z$  порядка 38 дБ в большом динамическом диапазоне изменения входных сигналов. При приближении действующего значения к максимальному начинают проявляться шумы ограничения.

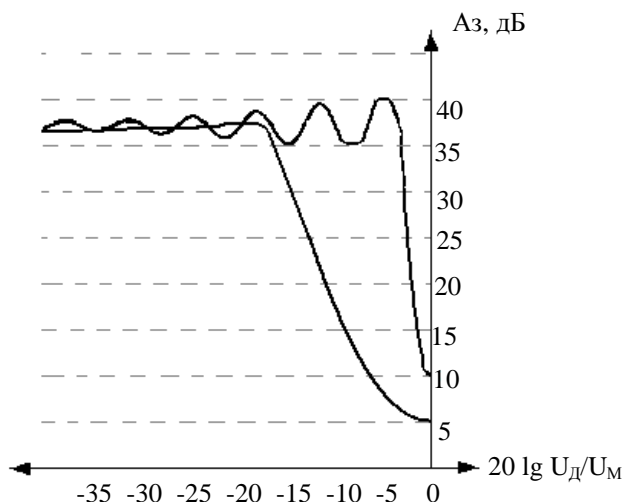


Рис. 4.57 – Зависимость защищенности от отношения  $U_d/U_m$

Шумы ограничения можно регулировать выбором  $S_{\text{огр}}$ . Кроме того, эти шумы автоматически снижаются вследствие психологического фактора. При повышении громкости речи дополнительно возникшие шумы заставляют абонентов говорить тише.

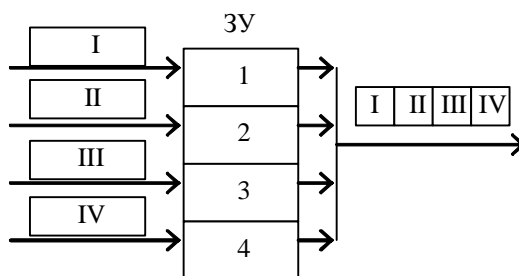
#### 4.7 Объединение цифровых потоков

Первичные цифровые потоки (ИКМ-30) могут объединяться для увеличения скорости передачи информации по одному групповому тракту. При этом за одно и то же время, например длительность цикла, нужно передать число канальных интервалов в несколько ( $n$ ) раз большее, чем в первичном потоке. Это означает, что длительность передаваемых импульсов в  $n$  раз должна быть короче.

Объединение осуществляется следующим образом (рисунок 4.58). Входные цифровые последовательности поступают параллельно на входы запоми-



нающих устройств, где часть их записывается. После окончания записи осуществляется поочередное считывание в общую нагрузку за более короткое время.



#### 4.58 – Объединение цифровых потоков

В ЗУ может записываться один символ (побитовая запись) или группа символов. Чаще всего во втором случае записываются байты (побайтная запись). При объединении и разделении цифровых потоков различают три случая:

- 1) синфазно-синхронное объединение;
- 2) синхронное объединение;
- 3) асинхронное объединение.

При синфазно-синхронном объединении (рисунок 4.59) равны скорости объединяемых потоков (один и тот же тактовый генератор) и все они поступают без задержки в один и тот же момент времени (с одинаковой фазой).

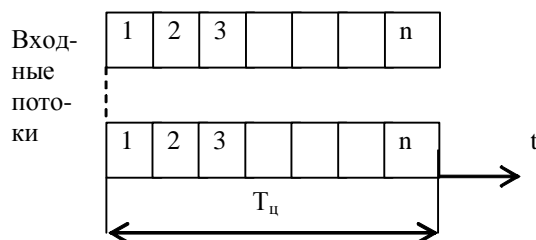


Рисунок 4.59 – Синфазно-синхронное объединение

При синхронном объединении (рисунок 4.60) скорости входных потоков по-прежнему равны, но моменты их прихода на ЗУ разные вследствие задержки в каналах связи. В этом случае в каждом канале для синхронизации вводятся несколько служебных байтов (А, В). Помимо функции синхронизации эти байты могут нести и другую служебную информацию. Так как эти байты должны быть переданы вместе с информацией за неизменное время  $T_{ц}$ , то скорость считывания будет больше, чем при синфазно-синхронном объединении. Например, если на каждые 32 байта входной последовательности добавляется один служебный, увеличение скорости будет равно  $33/32$ .

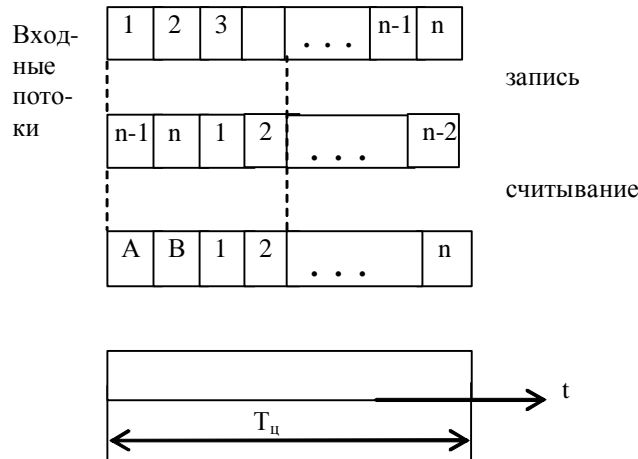


Рисунок 4.60 – Синхронное объединение

В случае асинхронного объединения, помимо фазовой задержки, входные потоки могут иметь еще и разные скорости. Обычно это характерно для плезиохронных систем передачи, когда генераторное оборудование на передающей стороне имеет свои автономные генераторы тактовой частоты. Частоты этих генераторов не могут совпадать абсолютно точно, т.е. содержат разброс по тактовой частоте  $\Delta f_T$ . Кроме того, любому генератору присуща нестабильность частоты, что увеличивает разброс и делает его случайным. Поэтому разница между скоростью при записи  $V_3$  и скоростью при считывании  $V_c$  может быть как положительной, так и отрицательной. И в том и в другом случае скорость записи и считывания надо согласовывать. Изменить тактовую частоту генератора считывания мы не можем, потому что он один для всех входных потоков. Следовательно, нужно изменять скорость каждого из них при записи (рисунок 4.61).

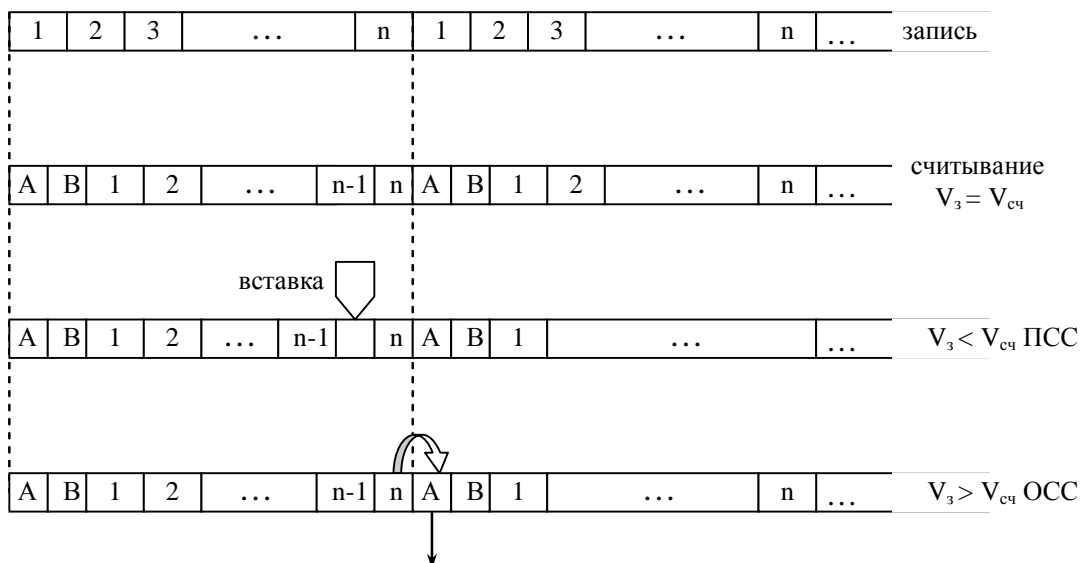


Рисунок 4.61 – Асинхронное объединение каналов

Если  $V_3 = V_c$ , никакого согласования не нужно. При  $V_3 < V_c$  имеем дело с положительным согласованием скоростей (ПСС). В этом случае процесс считывания заканчивается раньше положенного времени и образуется временная пауза, которая увеличивается со временем. В определенный момент эта пауза становится равной длительности импульса посылки и следящее устройство ЦСП вырабатывает команду на ПСС. По этой команде в конце цикла процесс считывания задерживается на одну позицию так, как будто между двумя информационными импульсами ( $n-1$  и  $n$ ) вставим «пустой». Эту процедуру называют торможением, или «стаффигом», от слова «вставка» – стаффинг.

При  $V_3 > V_c$  (отрицательное согласование скоростей – ОСС) для  $n$ -го импульса не хватает позиции. По команде согласования скоростей (КСС) последний  $n$  импульс передается вместо одного из служебных в следующем.

Управление согласованием скоростей осуществляется посредством КСС, которые вырабатываются в самом устройстве объединения (мультиплексоре) по мере того как задержка или опережение достигают критического значения. В оборудовании разделения потоков КСС поступают в байтах служебной информации на определенных позициях. Обычно используют систему двустороннего (положительного и отрицательного) согласования скоростей, хотя она и сложнее односторонней. В двусторонней системе необходимость подачи КСС возникает гораздо реже, а следовательно, и меньше вероятность ошибки согласования. Поскольку ошибка в согласовании скоростей приводит к потере синхронности передачи, а следовательно, к разрыву связи, при передаче КСС принимают специальные меры: для повышения помехозащищенности команд каждый бит информации КСС передается три раза, а также применяется специальный алгоритм обработки принятых команд, позволяющий исключать ошибки согласования, даже если отдельные КСС будут опознаны неверно.

#### **4.8 Плезиохронная цифровая иерархия**

Описанные выше принципы организации первичных цифровых потоков (ИКМ-30) и их объединение позволили предложить плезиохронную цифровую иерархию ЦСП (рисунок 4.62).

Здесь на каждой ступени объединения группируются четыре цифровых потока и к ним добавляются служебные символы, в которых помещаются сигналы синхронизации объединенного потока, команды согласования скоростей каждого из объединяемых потоков и информация, которая исключается из потока при отрицательном согласовании скоростей.

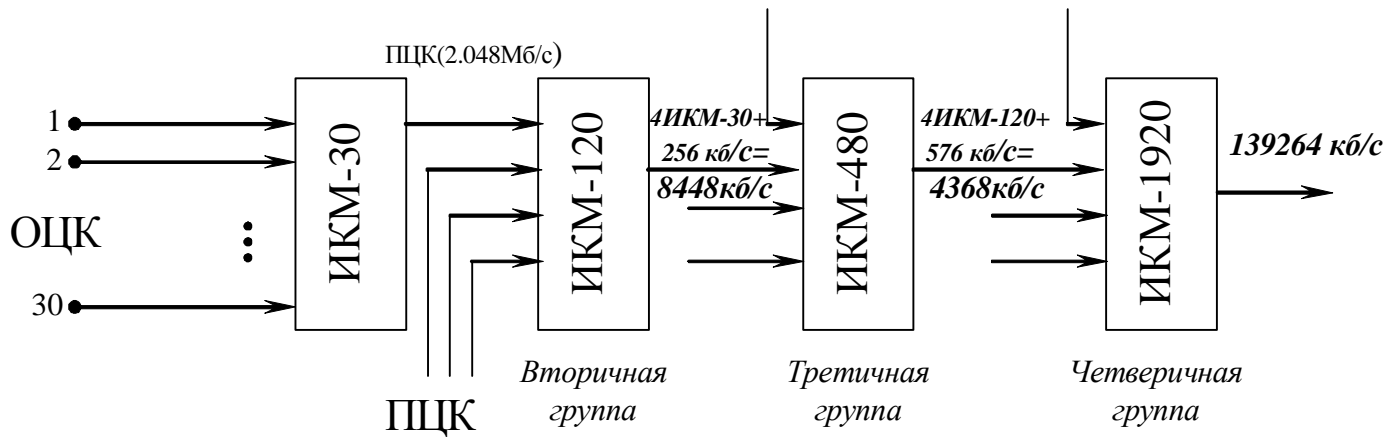


Рисунок 4.62 – Плезиохронная цифровая иерархия

Рассмотрим временной план вторичной группы (рисунок 4.63). Временной спектр (цикл передачи) вторичной ЦСП с ИКМ (ИКМ-120) является типичным для всех ЦСП с ИКМ высших

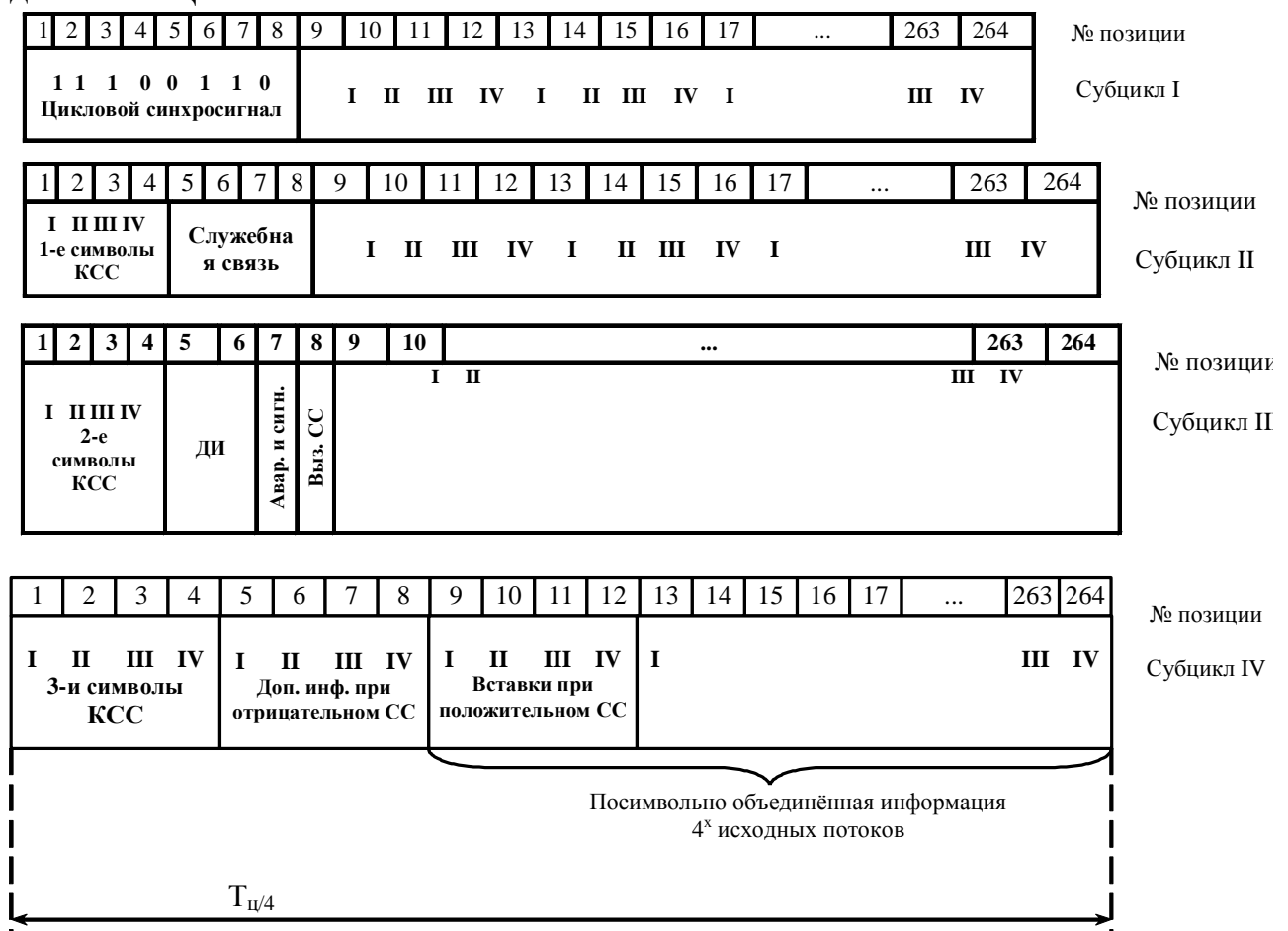


Рисунок 4.63 – Временной спектр ЦСП ИКМ-120

ступеней плезиохронной иерархии. Цикл передачи имеет длительность 125 мкс и состоит из 1056 позиций. Цикл разделен на четыре субцикла, одинаковых по длительности. Первые восемь позиций первого субцикла заняты комбинацией

111001100, представляющей собой цикловой синхросигнал объединенного потока. Остальные 256 позиций первого субцикла (с 9-ой по 264-ю включительно) заняты информацией посимвольно объединенных исходных потоков, номера которых отмечены на рисунке под номерами позиций. Первые четыре позиции второго субцикла заняты первыми символами КСС объединяемых потоков, а следующие четыре – сигналами служебной связи. Вторые и третьи символы КСС (команда согласования скоростей) имеет вид 111, а отрицательного – 000 занимают первые четыре позиции субциклов III и IV. Позиции 5–8 субцикла III используются для передачи сигналов дискретной информации (две позиции), аварийных сигналов (одна позиция) и вызова по каналу служебной связи (одна позиция). Наконец, в субцикле IV на позициях 5–8 передается информация объединяемых потоков при отрицательном согласовании скоростей. При положительном согласовании исключаются позиции 9–12 субцикла IV. Поскольку операция согласования скоростей осуществляется не чаще, чем через 78 циклов, позиции 6–8 субцикла IV, предназначенные для передачи информации при отрицательном согласовании, большую часть времени свободны и используются для передачи информации о промежуточных значениях и характере изменения паузы. Таким образом, из общего числа позиций, равного 1056, информационными являются  $1024 \pm 4$  позиции.

Разделение цикла передачи на несколько субциклов имеет следующие преимущества. Во-первых, это позволяет разнести во времени символы КСС, что повышает защищенность этих команд от импульсных помех, поскольку импульсные помехи обычно группируются в пакеты, воздействующие на несколько следующих друг за другом импульсов. Во-вторых, поскольку при приеме служебной информации прекращается считывание информации из ЗУ, выделяемый информационный поток обладает неравномерностью, которая должна сглаживаться системой ФАПЧ. Работа ФАПЧ сопровождается фазовыми флуктуациями импульсов выделенного потока, которые снижаются, если снижается неравномерность, а она тем меньше, чем больше субциклов содержится в цикле передачи. Наконец, в-третьих, задержка считывания информации объединяемых потоков из ЗУ как на передаче, так и на приеме на время прохождения служебной информации заставляет увеличивать емкость памяти ЗУ. Очевидно, что это увеличение тем меньше, чем больше субциклов содержится в цикле, и составляет для рассматриваемого случая две ячейки плюс еще одна на время проверки КСС на отсутствие ошибок. Общее число ячеек ЗУ существующих ЦСП составляет от пяти до восьми и должно быть увеличено по крайней мере втрое при отсутствии деления цикла передачи на субциклы.

#### **4.9 Синхронная цифровая иерархия (SDH)**

Новая цифровая иерархия была задумана как скоростная информационная среда передачи для транспортирования цифровых потоков с разными скоростями. В этой иерархии объединяются и разъединяются потоки со скоростями 155,520 Мбит/с и выше. Поскольку способ объединения был выбран синхрон-

ный, то данная иерархия получила название синхронной цифровой иерархии (Synchronous Digital Hierarchy – SDH).

Перечислим следующие предпосылки создания SDH:

1. Активное внедрение цифровых систем передачи.
2. Недостатки системы плезиохронной цифровой иерархии (ПЦИ = PDH), а именно:
  - а) сложность объединения и разделения цифровых потоков; необходимо согласование скоростей, т.к. у каждого потока различные тактовая частота  $f_T$  и скорость;
  - б) при выделении первичного потока ИКМ-30 нужно последовательно демультиплексировать группы ИКМ-120, ИКМ-480 и т.д., выделить что нужно, а потом снова провести объединение;
  - с) средства ПЦИ разных изготовителей зачастую не стыкуются друг с другом;
  - д) наличие разных европейской и американской систем ПЦИ.

3. Внедрение линий связи с большой пропускной способностью (ВОЛС, ЦРРЛ).

Основные принципы СЦИ:

1. Временное разделение каналов (ВРК).
2. СЦИ работает с гораздо большими скоростями передачи информации: 155,52 Мбит/с, 622,08 Мбит/с и т.д.
3. Синхронная цифровая иерархия включает в себя все предыдущие транспортные протоколы – это PDH, ISDN, ATM.
4. Контейнерный способ упаковки данных.

Для передачи цифрового потока создается синхронный транспортный модуль (Synchronous Transport Module) STM-1 (таблица 4.5):. Чтобы создать более мощные цифровые потоки, в SDH-системах формируется следующая цифровая иерархия: четыре модуля STM-1 объединяются путем побайтового мультиплексирования в модуль STM-4, передаваемый со скоростью 622,080 Мбит/с; затем четыре модуля STM-4 объединяются в модуль STM-16 со скоростью передачи 2488,320 Мбит/с; четыре модуля STM-16 могут быть объединены в высокоскоростной модуль STM-64 (9953,280 Мбит/с).

Таблица 4.5 Состав STM-1

Уровень	Контейнер	Сигналы ПЦИ, Мбит/с		
1	C1-1	1,5	T1	Американский
	C1-2	стандарт 2 (ИКМ-30)	E1	Европейский
2	C2	стандарт 6	T2	Американский
3	C3	стандарт 34 (ИКМ-480)	E3	Европейский

		45 (США) стандарт	T3	Американский
4	C4	140 стандарт	E4	Европейский

В сети SDH применены принципы контейнерных перевозок. Подлежащие транспортировке сигналы предварительно размещаются в стандартных контейнерах (Container – C). Все операции с контейнерами производятся независимо от их содержания, чем и достигается *прозрачность* сети SDH, т.е. способность транспортировать различные сигналы, в частности сигналы PDH.

На рисунке 4.64 показана структура модуля STM.

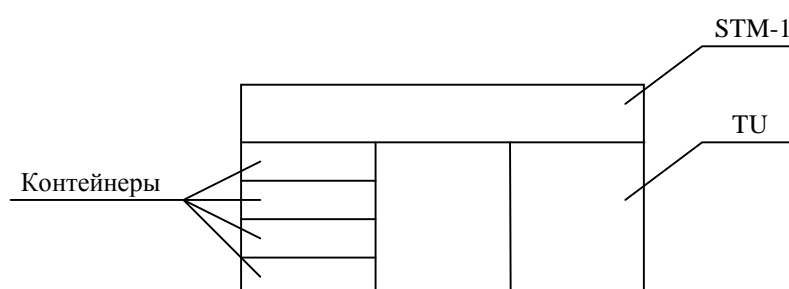


Рисунок 4.64 Синхронный транспортный модуль

Он разбивается на субблоки (TU-Tributary Unit). А те в свою очередь разбиваются на контейнеры по 2 Мбит/с, 34 Мбит/с, 144 Мбит/с.

При передаче у каждого STM, TU и контейнера существует свой номер, называемый заголовком.

Как размещается информация в этих контейнерах? Контейнеры вкладываются в STM. STM перемещается во времени независимо от объема поступающей информации и времени ее поступления. Поэтому контейнеры помещаются в тело (объем) модуля случайно, асинхронно. Чтобы идентифицировать положение контейнера в вагоне, вводят указатель (Pointer). Поскольку при такой схеме заполнения STM его использование не рационально, в дальнейшем производится переупаковка. При этом указатели контейнеров и блоков меняются в соответствии с новым положением.

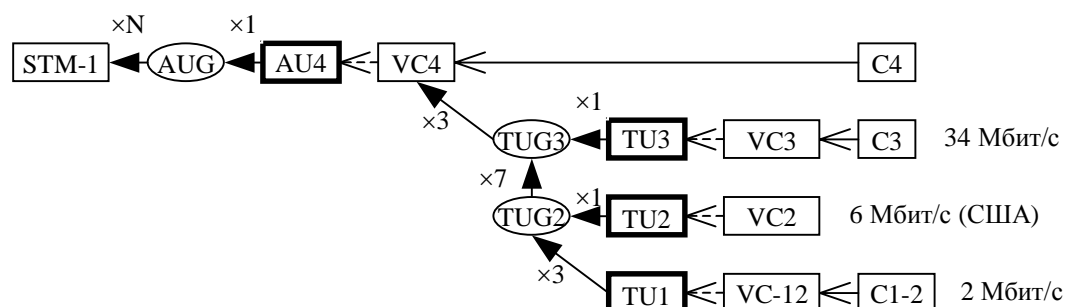


Рисунок 4.65 – Упрощенная схема преобразования в SDH  
(для европейской иерархии):

VC – виртуальный контейнер;

TUG – группа субблоков;

AU – административный блок;

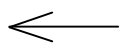
AUG – административная группа;



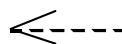
Размещение указателей;



Мультиплексирование;



Размещение цифровых потоков в виртуальных контейнерах;



Выравнивание: плавающий режим, формирование нагрузки, выравнивание скоростей

#### **Этапы формирования STM-1:**

1. Поступающий цифровой сигнал упаковывают в контейнер C.

2. Добавлением маршрутного или трактового заголовка (Path Over Head – POH) контейнер преобразуется в виртуальный контейнер VC  
 $VC = C + POH$ .

Виртуальный контейнер формируется и расформируется в точках окончания и начала тракта. Заголовок POH, кроме адреса, позволяет осуществить контроль качества передачи по тракту, передачу аварийной и эксплуатационной информации.

3. Виртуальный контейнер снабжают указателем PTR и образуют тем самым транспортный блок TU (Tributary Unit)  
 $TU = VC + PTR_{TU}$ .

PTR – указатель начала VC внутри субблока. PTR осуществляет дополнительно выравнивание скоростей.

4. Затем несколько транспортных блоков путем мультиплексирования объединяют в группу транспортных блоков TUG (Tributary Unit Group).

5. Затем TUG путем мультиплексирования преобразовывается в виртуальный контейнер VC-4.

6. VC-4 снабжают секционным заголовком SOH, образуя таким способом административный блок AU-4.

7. Последний помещают непосредственно в модуль STM-1 вместе с секционным заголовком SOH (Section Over Head)

$STM-1 = AUG + SOH$ ,

где SOH – секционный заголовок

$SOH = RSOH + MSOH$ ;

RSOH – заголовок регенераторной секции;

MSOH – заголовок мультиплексорной секции.



**Примечание:** если мы имеем цифровой поток со скоростью 139,264 Мбит/с, образуемый на выходе аппаратуры плезиохронной цифровой иерархии ИКМ-1920, то его сначала упаковывают в контейнер C-4, а затем добавлением маршрутного или транспортного заголовка POH преобразуют сразу в виртуальный контейнер VC-4. Т.е. в этом случае пропускается создание транспортных блоков и групп.

8. Образование синхронных транспортных модулей высшего порядка

$$STM-N = \sum STM-i + (RSOH + MSOH)_i + AUPTR_i,$$

где  $AUPTR_i$  – указатель положения STM внутри потока.

Рассмотрим структуру тракта (рисунок 4.66).

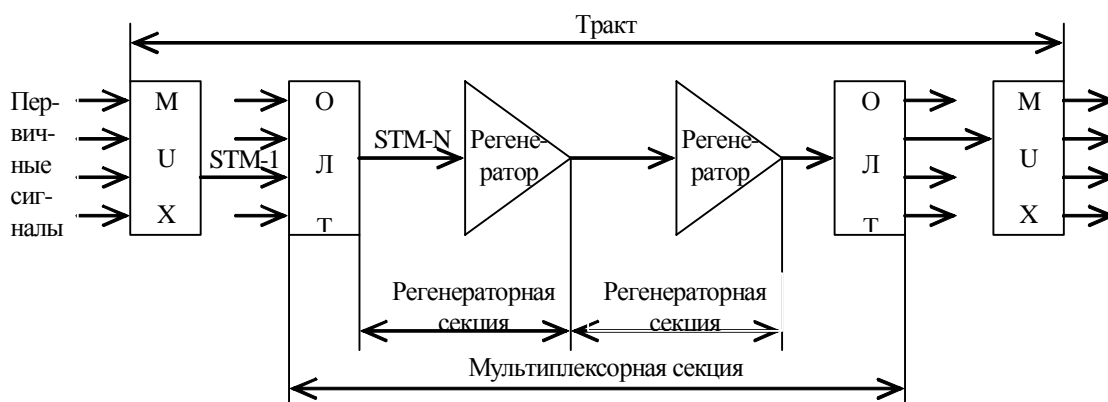


Рисунок 4.66 – Структура тракта:

ОЛТ – оборудование линейного тракта;

MUX – мультиплексор

Из рисунка 4.66 можно определить некоторые функции заголовков RSOH и MSOH. Заголовок RSOH помимо основной функции идентификации  $STM_N$  должен обеспечивать цикловую синхронизацию, служебную связь, аварийную сигнализацию, контроль и исправление ошибок в соответствующей регенераторной секции.

Заголовок MSOH также обеспечивает функции контроля ошибок, технического обслуживания и управления мультиплексором, но уже в пределах всего тракта.

Рассмотрим структуру кадра модуля STM-1 (рисунок 4.67).

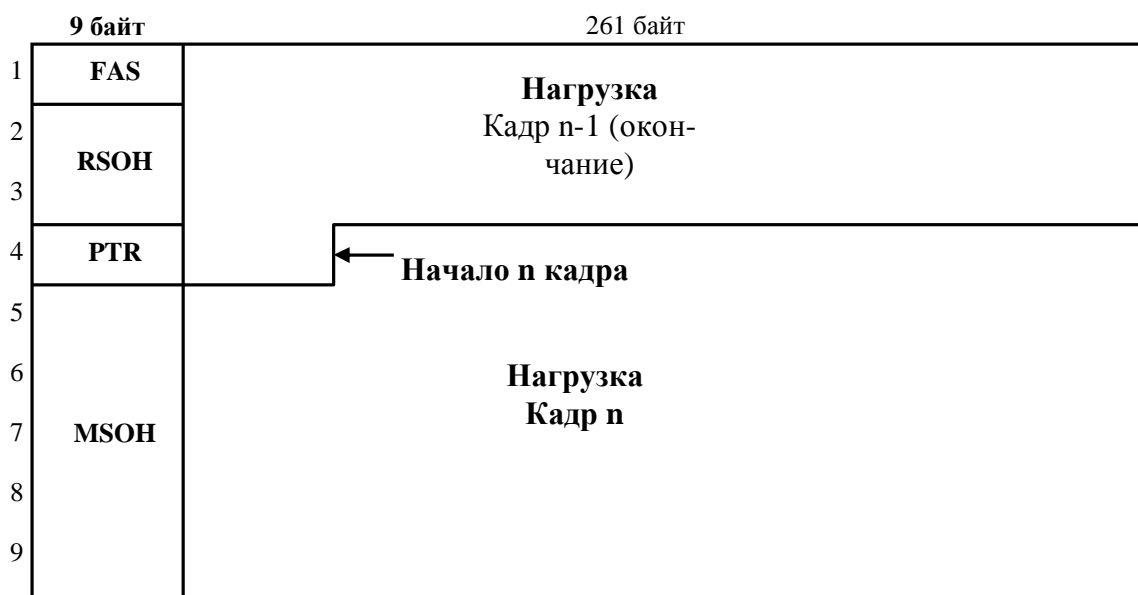


Рисунок 4.67 -Структура кадра STM-1

Здесь все размеры приведены в байтах, поскольку в системе SDH используется побайтная организация. Всего в модуле STM-1 содержится 19440 бит (125 мкс\*155.52 Мбит/с) или 2430 байт. Для удобства отображения эти байты расположены в виде прямоугольной таблицы, в которой 9 строк. Каждая строка содержит 270 байт. Поле этой таблицы разделено на две части: информационную и служебную – заголовок. Под заголовок отведены первые 9 байт каждой строки (всего 81 байт).

Первые 9 байт первой строки содержат сигнал кадровой синхронизации FAS(Frame Alignment Signal), остальные 261 байт – информационные(полезная нагрузка). Первые 9 байт второй и третьей строки представляют заголовок регенераторной секции RSOH, но во времени этот заголовок разделен. Между его первой и второй частями размещен 261 байт полезной нагрузки

Четвертая строка начинается с указателя PTR, а остальные 5 строк заголовка(45 байт) отведены под заголовок мультиплексорной секции MSON. Указатель используется для обозначения начала полезной нагрузки кадра. Как видно из рисунка 4.67 она начинается не с первой строки кадра после сигнала FAS, а обязательно после указателя и с того места, которое он указывает. Поэтому нумерация емкости нагрузки начинается с десятого байта четвертой строки. Допустимые значения указателя в десятичной системе О-782, что позволяет полезной нагрузке смещаться(«плавать») в кадре. Эти смещения обусловлены случайными факторами(рассинхронизация, помехи и т.д.).

«Плавающий» режим нагрузки внутри контейнера позволяет сочетать эти нестабильности во времени с синхронностью работы всей системы в целом, позволяет выделять и вставлять любые отдельные контейнеры.

Размещение указателя начала нагрузки в средней части STM-1 не случайно. В этом случае для выполнения каких-то действий о перераспределении нагрузки(ввод или вывод компонентных сигналов и т.п.) есть время от момента

окончания FAS до начала нагрузки. Если бы нагрузка начиналась с первой строки STM-1, информацию пришлось бы записывать в буфер, и потом выполнять все операции ввода-вывода.

Плавающий режим нагрузки позволяет решить вопросы согласования скоростей, не нарушая синхронного режима работы. Несмотря на высокую стабильность тактовых генераторов, принимаемый сигнал не полностью синхронизирован с местным генератором. Поэтому и в SDH необходимо как отрицательное согласование скоростей (ОСС), так и положительное (ПСС). При ОСС, как и в PDH, применяется понятие стаффинга. Для выравнивания используются 10-12 байты четвертой строки. При ОСС, когда частота принимаемого сигнала меньше частоты местного генератора и часть байтов не помещается в кадр, для их размещения используется поле указателя (7-9 байты четвертой строки).

Структура указателя приведена на рисунке 4.68. Здесь значение указателя содержат байты H1 и H2, причем для него отводится 10 бит (рисунок 4.68)

H1	Y	Y	H2	1*	1*	H3	H3	H3
----	---	---	----	----	----	----	----	----

Э  
то биты Рисунок 4.68 Структура PTR кадра STM-1  
7,8 H1 и

1-8 H2. Такое количество бит позволяет иметь максимальное значение указателя в десятичной системе 1023, однако допустимые значения указателя лежат в диапазоне 0-782. Содержание указателя разбито на две группы: нечетные I и четные D. Это сделано для обеспечения его помехоустойчивости. Чаще всего приращение указателя происходит на  $\pm 1$ . Поэтому при увеличении значения указателя инвертируются все нечетные биты ( $0 \rightarrow 1$ ,  $1 \rightarrow 0$ ), а при уменьшении инвертируются все четные биты. Достаточно зафиксировать инверсию хотя бы трех бит относительно предыдущего кадра, чтобы сделать вывод об изменении значения указателя.

В указателе биты, обозначенные как N объявляют об изменении значения указателя. В нормальном состоянии NNNN=0110, при изменении данных указателя NNNN=1001. Биты SS определяют тип полезной нагрузки (контейнера) AU-3 или AU-4.

Наконец байты H3 в указателе составляют тот резерв, который нужен для отрицательного согласования скоростей. Байты Y и 1\* не несут какой-то информации и по сути являются резервными.

Рассмотрим теперь подробнее структуру заголовков RSOH и MSOH (рисунок 4.69).

R S O H	A1	A1	A1	A2	A2	A2	C1			
	B1			E1			F1			
	D1			D2			D3			
M S O H	Указатель AU-4									
	B2	B2	B2	K1			K2			
	D4			D5			D6			
	D7			D8			D9			
	D10			D11			D12			
	Z1	Z1	Z1	Z2	Z2	Z2	E2			

Рисунок 4.69 Структура заголовка STM-1

Здесь байты A1 и A2, как уже говорилось, предназначены для кадровой синхронизации(FES) A1=11110110; A2=00101000. C1- идентификатор STM, показывает номер, присвоенный STM-1. Это необходимо, чтобы идентифицировать различные модули STM-1 в модулях более высокого порядка STM-4.

Байт B1 предназначен для контроля ошибок, при прохождении сигнала через регенератор. Для этого он подвергается кодированию по алгоритму ВР-8. Суть этого метода заключается в суммировании по модулю 2 всех одноименных битов каждого передаваемого байта в начале на передающем конце. Полученные значения сумм передаются одним байтом, который потом сравнивается побитно с аналогичным байтом, полученным на приемном конце. Ниже приведен пример действия такого алгоритма.

Байты	Передатчик		Приемник
1	01010110		01010110
2	10110110		11111111
3	10101010		10101010
4	.....	Помеха→	.....
2429	11001101		11001101
2430	01100110		01100110
ВР-8	11100001		<u>10101000</u> <u>ошибки</u>

При помощи ВР-8 можно обнаружить 8 ошибок(по одной в каждом бите) в контейнере. Двойные ошибки не обнаруживаются.

Байты E1 и F1 служат для организации служебной связи и дополнительной передачи данных соответственно. Байты D1-D3 формируют встроенный канал управления(TMN).

Последние пять строк заголовка служат для взаимодействия с мультиплексорами. Байты V2, E2, D4-D12 определяют те же функции, что и аналогичные байты в RSON. Байты K1 и K2 организуют канал автоматического переключения на резерв при авариях, а также служат для передачи сообщения об этих авариях. Байты Z1, Z2, X предназначены для национального применения, а байты не отмеченные никак – для международного применения в будущем.

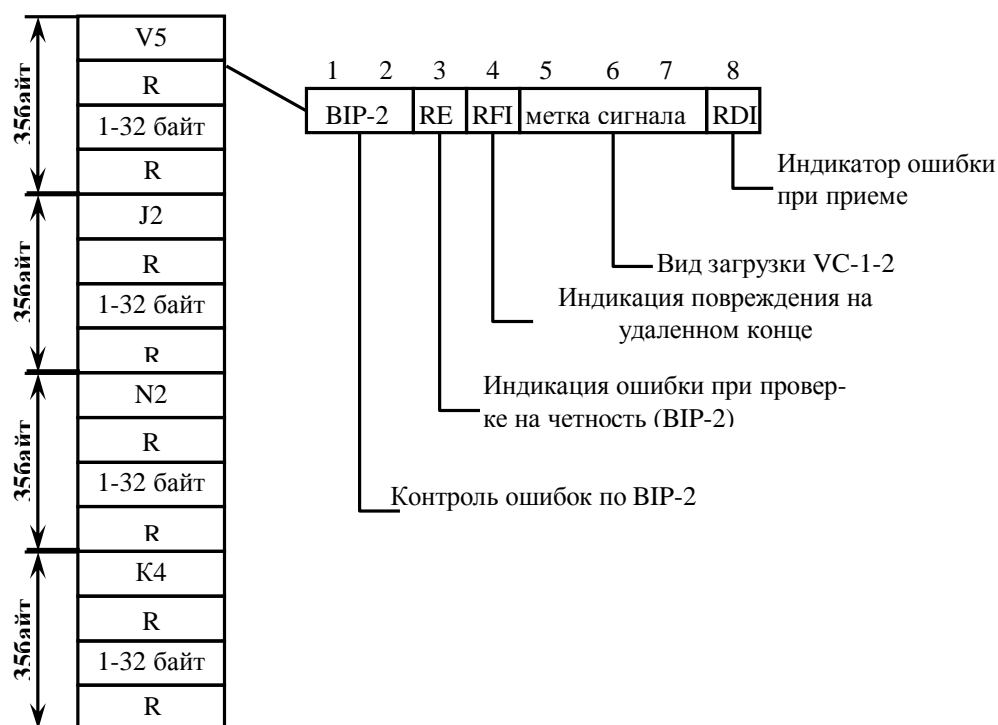


Рисунок 4.70 Структура VC1-2

Рассмотрим теперь мультиплексирование контейнеров низшего порядка в STM-1 на примере контейнеров C1-2. Схематично процесс мультиплексирования показан на рисунке 4.65. Здесь приведем более детальное рассмотрение. Структура виртуального контейнера VC1-2 и его заголовок РОН представлен байтами V3, J2, N2 и K4 в четырех кадрах, составляющих мультикадр.

Назначение битов заголовка следует из рисунка. Поле «Вид загрузки» означает следующее. При формировании нагрузки VC1-2 допускается три варианта:

- бит-синхронный режим, когда сигнал не имеет побайтной структуры. Этот режим задается кодом 011, но он практически не используется.

- байт-синхронный режим. В этом случае начало сигнал строго совпадает с началом кон-

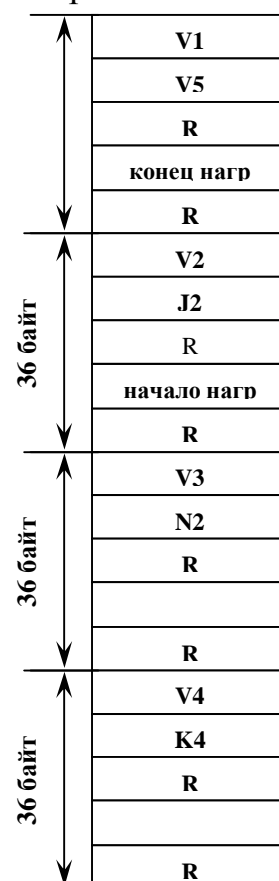


Рисунок 4.71 -Мультикадр

тейнера. Другими словами, при этом режиме указатель(PTR) не нужен. Этот режим идентифицируется – 100. На практике применяется не так часто.

- асинхронный режим (010) допускает смещения нагрузки и, соответственно, требует применения указателей. Этот режим размещения нагрузки наиболее распространен, поэтому рассмотрим его подробнее.

Байт J2 служит, также как и J0 для идентификации контейнера и его маршрута. Как и байт N2 V5 выполняет функции мониторинга канала связи, а байт K4 определяет возможность автоматического резервирования.

Функции указателя при формировании VC1-2 те же самые, что и для AU-4, а именно поддержание плавающего режима нагрузки и выравнивание скоростей. Для этих целей одного дополнительного байта не достаточно, поэтому формируется мультикадр, состоящий из четырех кадров (рисунок 4.71). Байты V1, V2 указывают начало нагрузки, которая начинается не в первом, а во втором кадре(РОН идет после V2). Структура и назначение байтов V1 и V2 такая же как у N1и N2(рисунок 4.72). Байт V3 и следующий за ним байт R используются для выравнивания скоростей. При положительном согласовании информационные байты сдвигаются от V3 к V4. При отрицательном согласовании они сдвигаются в противоположном направлении и в поле указателя V3 могут занять несколько бит

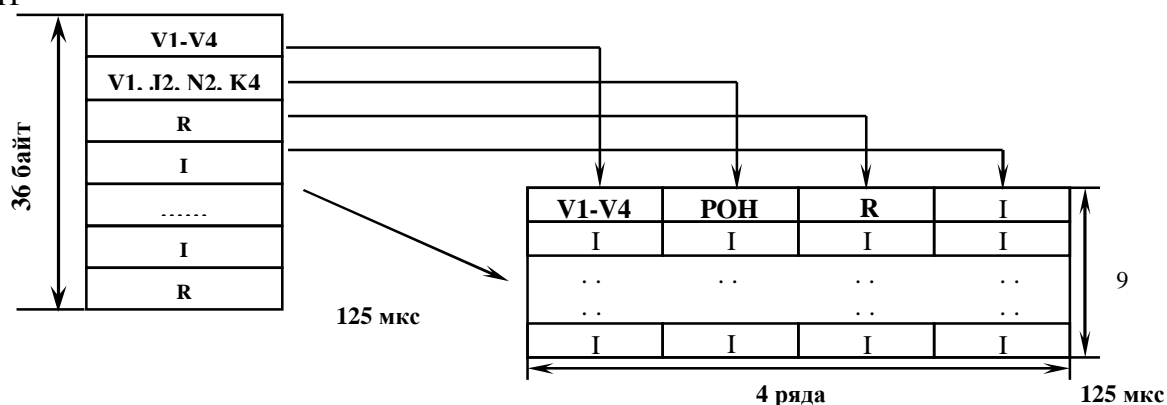


Рисунок 4.72 - Размеры и формат TU-12

Процесс мультиплексирования подробно изображен на рисунке 4.73..



### **Достоинства СЦИ:**

1. Упрощенный процесс мультиплексирования и демультиплексирования. Здесь не надо распаковывать весь модуль, как в ПЦИ (см. Предпосылки создания SDH, пункт 2b), так как есть сквозная синхронизация и много заголовков разных уровней, контейнеров и субблоков.

2. Простота ввода компонентных сигналов – заголовки + плавающий режим.

3. Качественное управление сложными сетями:

- управление конфигурацией сетей (на уровне мультиплексоров);
- управление неисправностями: дистанционное выявление неисправности и ее исправление;
- управление качеством (выявление и ликвидация ошибок);
- управление безопасностью – регистрация несанкционированного доступа и т.п.

### **Недостатки SDH:**

1. Система достаточно дорогая.
2. Необходима высочайшая стабильность тактовой частоты.
3. Большое время вхождения в синхронизм.
4. Система чрезвычайно избыточна, т.к. групповой сигнал содержит много заголовков и свободных мест для дальнейшего использования. Но это окупается высокой пропускной способностью.

Рассмотрим конфигурацию транспортной сети SDH (рисунок 4.74).

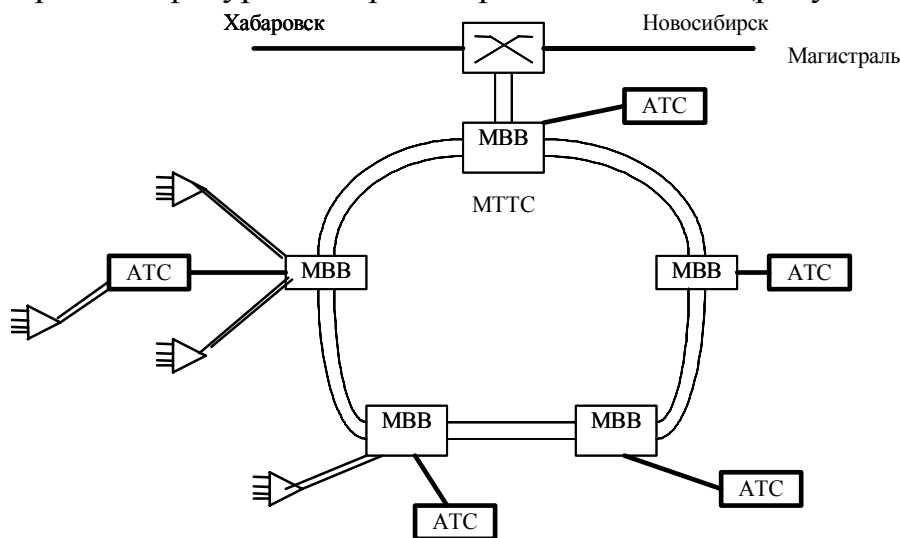


Рисунок 4.74 - Транспортные сети SDH

- Выносной концентратор (ВК)  
 Кросс-коннектор  
 MBV - Мультиплексор ввода-вывода



На рисунках 4.75 и 4.76 сеть управления телекоммуникациями (TMN) удаленно из узла управления задает конфигурацию сети (определяет, какие компоненты куда выделить или перенаправить).

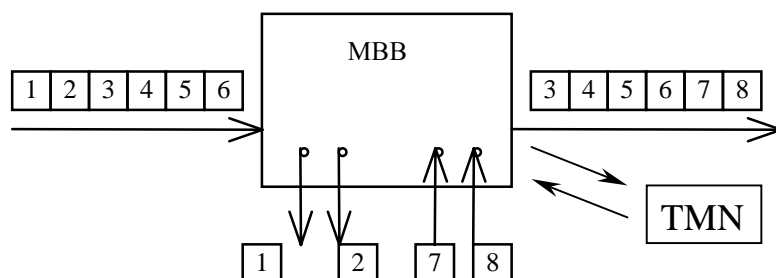


Рисунок 4.75– Работа мультиплексора ввода-вывода

Функция мультиплексоров заключается в вводе и выводе различных потоков ( $E1$ ,  $E3$ ,  $E4$ ,  $STM_i$ ) в синхронные транспортные модули высшего порядка, а также резервирование в сети. Число входных (выходных) потоков  $E1$  изменяется 63 до 272 (рисунок 4.75).

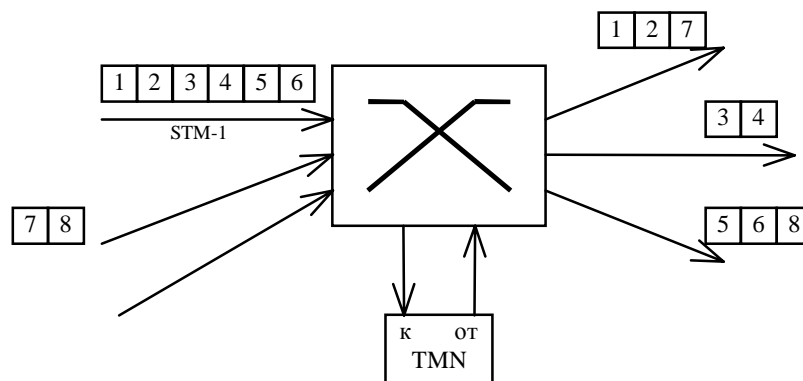


Рисунок 4.76 – Работа кросс-коннектора

Кросс-коннекторы переключают потоки иерархий PDH и SDH, и используются для оперативной реконфигурации сети и управлению ее ресурсами. В настоящее время в сетевых элементах функции мультиплексирования и коммутации совмещают. Более того, для цифровых потоков высокого уровня STM-64, STM-256, WDM, DWDM эти процедуры реализуются непосредственно с помощью оптических сигналов, без преобразования их в электрические (рисунок 4.76).

## 5. ЛИНИИ СВЯЗИ.

### 5.1 Кабельные линии связи.

Основой телефонных сетей, сетей передачи данных, кабельного телевидения являются кабельные линии передачи. В настоящее время на магистральных, зонавых сетях и сетях доступа используются воздушные линии (ВЛ), симметричный кабель (СК), коаксиальный кабель (КК), волоконнооптические линии связи (ВОЛС). Их основные характеристики приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 Характеристики кабельных линий связи

Тип кабеля	Частотный диапазон, МГц	Длина участка, км	усилит.	Применение
ВЛ	0,1	1-50		Сельская связь Зонавая связь
СК	1	3-20		Сети доступа Зонавая связь
КК	0,05-300	3-10		Кабельное телевидение Магистральная связь
ВОЛС	1-10 <sup>5</sup>	1-200		Зонавая связь Сети доступа

В кабельных линиях связи используются разнообразные режимы передачи. Чаще всего применяется однополосный четырехпроводный. При этом встречные цепи (провода) для симметричных кабелей помещаются в разных многопарных кабелях, а в коаксиальных линиях и в ВОЛС в одном и том же. В воздушных линиях применяются двухпроводный двухполосный режим передачи.

Требования, предъявляемые к линиям связи:

- дальность действия до 12500 км в России и 25000 км на международных линиях;
- высокая скорость передачи ( до 100 Гб/с);
- способность передавать различные виды информации (телевидение, телефония, данные и др.);
- высокая помехозащищенность от внешних и взаимных полей;
- стабильность электрических параметров, надежность связи.

### 5.2 Линии связи на симметричном кабеле.

Электрический кабель – это электротехническое изделие, содержащее изолированные друг от друга проводники, объединенные в одну конструкцию. В качестве изоляции используются бумага, полистирол, полиэтилен. Для обеспечения прочности, целостности и защиты от воз-

действий внешней среды провода заключены в общую герметичную оболочку. Чаще всего оболочка выполнена из пластмассы или металлопластика. Поверх оболочки помещается защитный покров, выполненный из металла или пластмассы.

Число пар проводников в кабеле может быть различным от 1 до 3000. В телефонии при домовой или квартирной разводке используются однопарные кабели ТРП («лапша»). Они объединяются в распределительных коробках (РК). Кабели, которые идут от группы абонентов (подъезд дома, офис учреждения и т.п.), содержат 10 и более пар. Эти кабели объединяются в распределительных шкафах (РШ) (рис. 5.1).

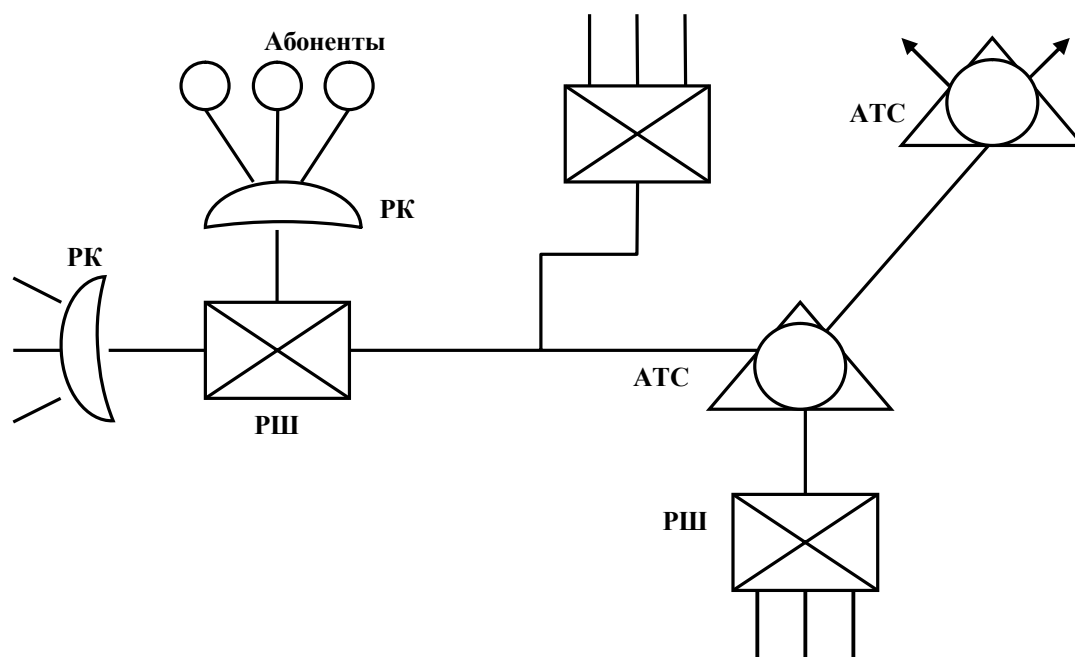


Рисунок 5.1- Схема участка городской телефонной сети

От шкафа к АТС идут кабели с числом пар от 100 до 3000.

В компьютерных сетях при построении локальных вычислительных сетей используются кабели с числом пар равным 4 (кабели UTP-3, UTP-5). В то же время существуют многопарные кабели с большим числом пар.

Примеры поперечных сечений некоторых применяемых кабелей приведены на рисунке 5.2.

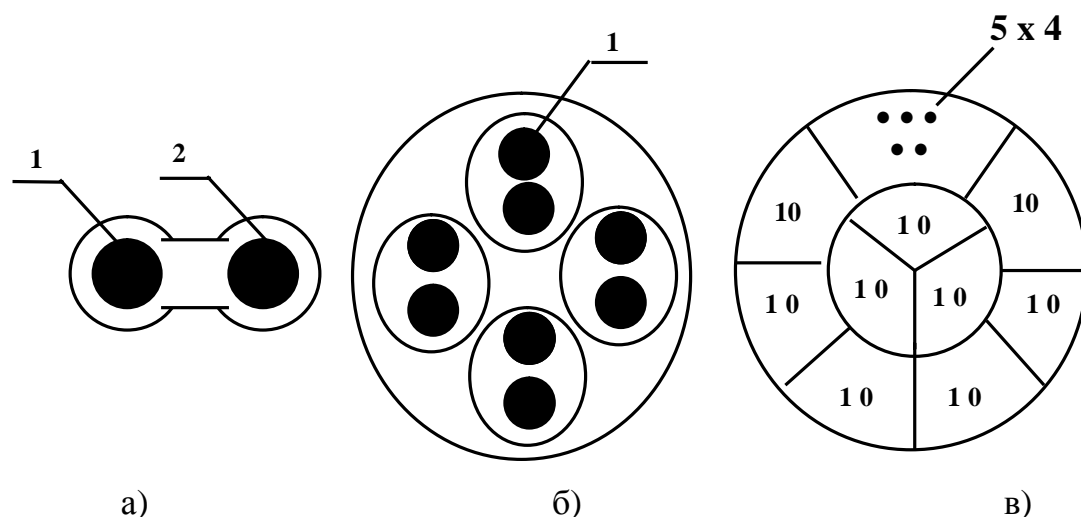


Рисунок 5.2- Поперечные сечения симметричных кабелей: а) однопарный б) четырехпарный в) стопарный. 1 – проводник, 2 - изоляция

В стопарном кабеле (рис. 5.2 в) в каждой из 10 ячеек помещено пять двухпарных кабелей.

Кабели, применяемые в компьютерных сетях, называют «витой парой».

Рассмотрим процессы передачи электромагнитных волн по двухпроводной симметричной линии. Структура силовых линий электрического  $\vec{E}$  и магнитного поля  $\vec{H}$  изображена на рисунке 5.3.

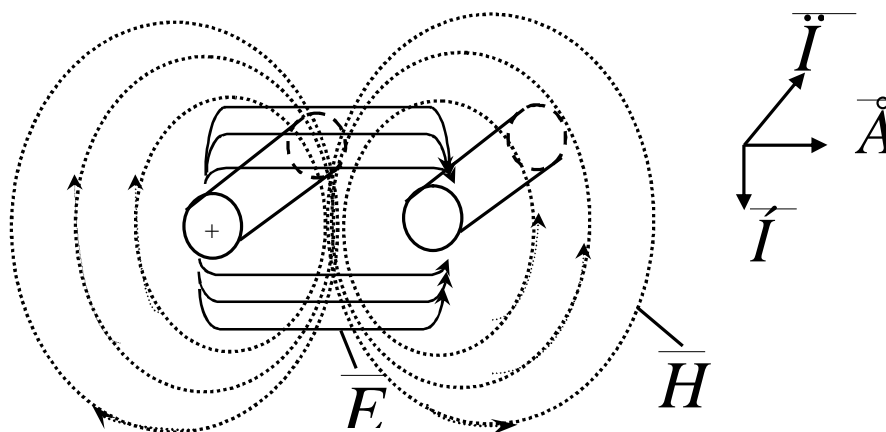


Рисунок 5.3 - Силовые линии векторов напряженности электрического и магнитного полей

Здесь силовые линии поля  $\vec{E}$  начинаются и заканчиваются на проводниках. Силовые линии поля  $\vec{H}$  непрерывны и замкнуты вокруг проводников с током  $I$ . Поскольку структура двухпроводной линии открытая, то часть силовых линий уходит от системы проводников. Это способствует взаимодействию поля симметричной линии с другими соседними проводниками (наводки) и излучению электромагнитной энергии,

когда силовые линии полей  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  отрываются от проводников. Эффекты излучения и наводки увеличиваются с ростом частоты.

Векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  перпендикулярны друг другу и вектору Пойнтинга  $\vec{I}$ , характеризующему плотность потока мощности в каждой точке среды распространения электромагнитной волны. Поэтому основная волна двухпроводной линии является поперечной электромагнитной волной ТЕМ или Т.

Рассмотрим параметры такой волны:

Фазовая скорость для среды без потерь –  $V_\phi = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}}$ , где

$\varepsilon, \mu$  – абсолютные электрическая и магнитная проницаемость среды.

В среде с потерями

$$V_\phi = \frac{\omega}{\beta}, \quad (5.1)$$

где  $\beta$  – коэффициент фазы или постоянная распространения,

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \cdot \varepsilon}{2} \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \cdot \varepsilon^2}} + 1 \right)}, \quad (5.2)$$

а  $\sigma$  – проводимость среды.

Нетрудно увидеть, что среда с потерями обладает дисперсией, когда фазовая скорость зависит от частоты

$$V_\phi = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu \cdot \varepsilon}{2} \left( 1 + \sqrt{\frac{\sigma^2}{\omega^2 \cdot \varepsilon^2}} + 1 \right)}}, \quad (5.3)$$

Зависимость фазовой скорости от частоты приведена на рисунке 5.4

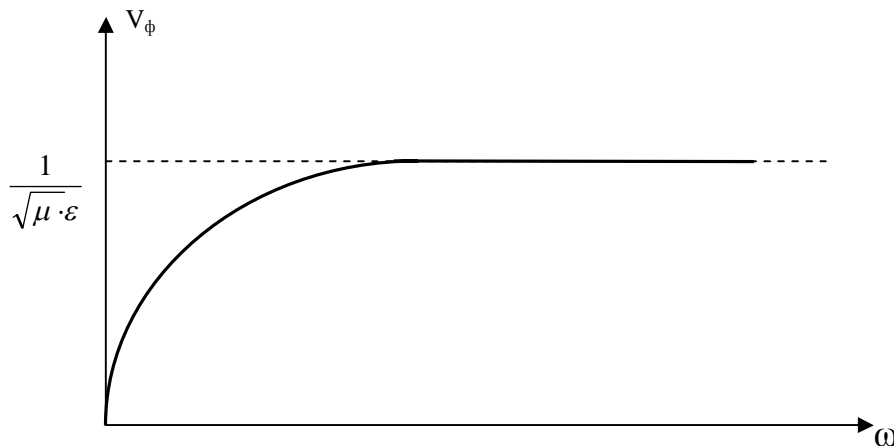


Рисунок 5.4 - Зависимость фазовой скорости ТЕМ волны в среде с потерями

Волновое сопротивление для среды с потерями

$$Z_T = \sqrt{\frac{l \cdot \omega \cdot \mu}{\sigma + l \cdot \omega \cdot \varepsilon}}, \quad (5.4)$$

также зависит от частоты при большой проводимости диэлектрика, что может наблюдаться на линиях с большим сроком действия и подверженного действию влаги.

На высоких частотах волновое сопротивление постоянно и равно

$$Z_T = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}.$$

Затухание в симметричной двухпроводной линии определяется несколькими факторами:

- Омические потери, которые увеличиваются с частотой благодаря поверхностному эффекту;
- потери за счет излучения и наводок на соседние металлические проводники, которые тоже возрастают с увеличением частоты;
- потери в диэлектрической среде, связанные с ее неидеальностью, наличием проводимости  $\sigma$  ( $\operatorname{tg} \delta \neq 0$ ). Эти потери также возрастают с частотой.

В прикладной теории симметричных кабелей пользуются эквивалентными схемами (рисунок 5.5).

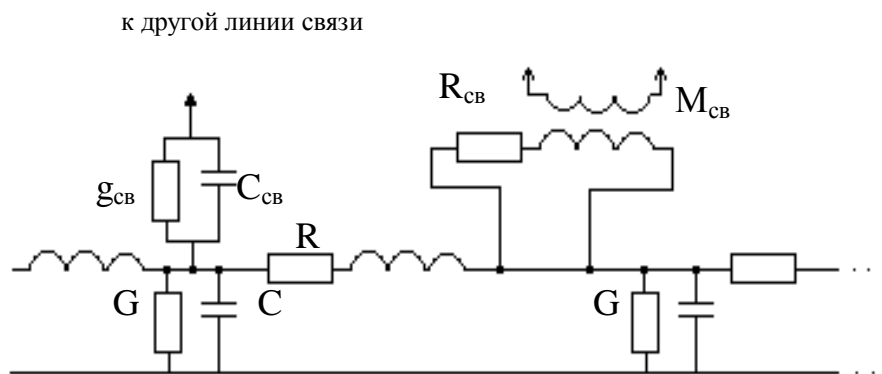


Рисунок 5.5 - Эквивалентная схема симметричной двухпроводной линии

На этой схеме сама линия характеризуется погонными параметрами: реактивностями  $L$  и  $C$ , активным сопротивлением  $R$  (омические потери) и активной проводимостью  $G$  (потери в диэлектрике). Связь с другими линиями учитывается с помощью емкости  $C_{cb}$  и проводимости  $g_{cb}$  (емкостная связь через электрическое поле) и взаимоиנדукции  $M_{cb}$  и сопротивления  $R_{cb}$  (индуктивная связь через магнитное поле).

Для линии без потерь эти параметры, которые называют первичными, выражаются так

$$R=0$$

$$L = \frac{\mu}{\pi} \cdot \ln \left[ \frac{d-r}{r} \right]$$

$$G = \frac{\pi \cdot \sigma}{\ln[(d - r)/r]}$$

$$C = \frac{\pi \cdot \varepsilon}{\ln[(d - r)/r]},$$

где  $d$  – диаметр проводов,  $r$  – расстояние между ними.

В линиях с потерями выражения для  $G$  и  $C$  практически не меняются, а выражения для  $R$  и  $L$  существенно усложняются.

Среди волновых параметров, которые называют вторичными, чаще всего пользуются комплексным коэффициентом распространения

$$\dot{\gamma} = \alpha + i \cdot \beta = \sqrt{(R + i \cdot \omega \cdot L) \cdot (G + i \cdot \omega \cdot C)}$$

и комплексным волновым сопротивлением

$$\dot{Z}_B = \sqrt{(R + i \cdot \omega \cdot L) / (G + i \cdot \omega \cdot C)}$$

Эти параметры в отличие от тех, что были приведены выше для ТЕМ волны могут учитывать поверхностный эффект и эффект близости других проводников. Однако качественные зависимости для фазовой скорости, волнового сопротивления и затухания в линии остаются теми же. Для примера на рисунке 5.6 приведены типичные зависимости для затухания и волнового сопротивления симметричной двухпроводной линии для разных значений диаметра медного провода  $d$ .

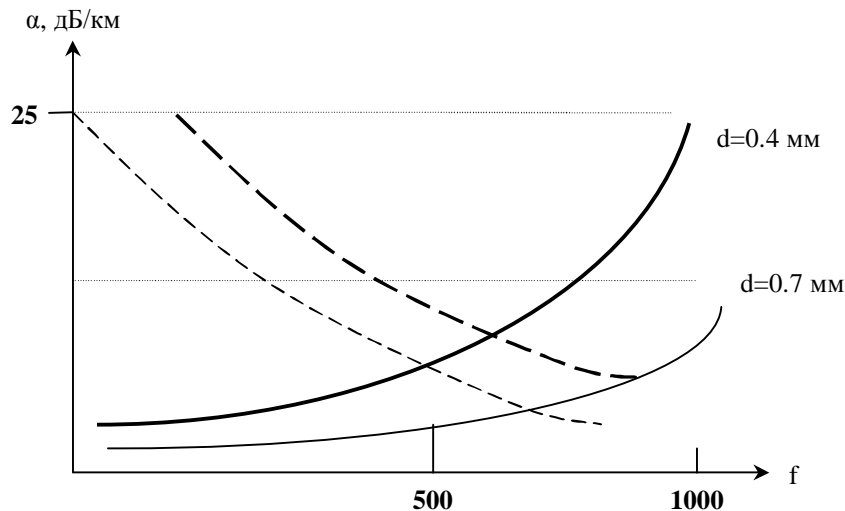


Рисунок 5.6 - Частотные зависимости затухания и волнового сопротивления симметричной линии

Приведенные зависимости доказывают, что обычные двухпроводные линии можно использовать в диапазоне до 300 – 500 МГц, но при этом надо решать задачу компенсации частотных искажений.

Рассмотрим подробнее явление взаимного влияния электромагнитных полей в многопарных кабелях (рисунок 5.7). Здесь в первой линии имеется источник сигнала  $U_{10}$ . При прохождении сигнала по линии во второй линии за счет наводки возникает э. д. с.  $\Delta U_3$ . Напряжение  $\Delta U_3$  приводит к появлению токов на ближнем  $I_{03}$  и на дальнем  $I_{L3}$  концах.

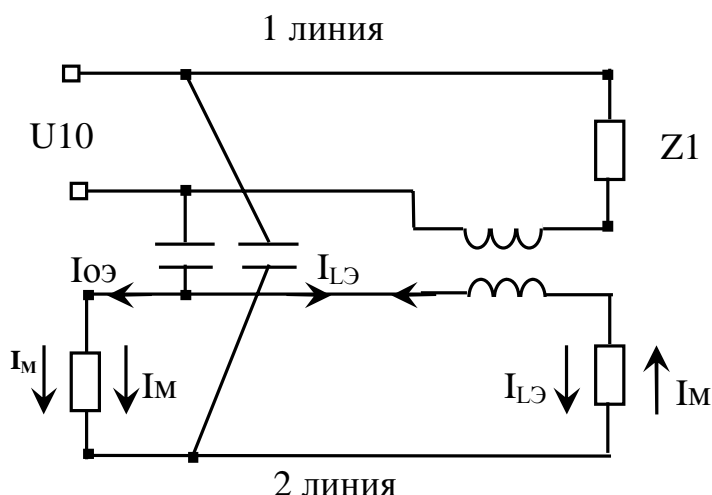


Рисунок 5.7 - Взаимное влияние в двухпарном кабеле

Одновременно за счет наводки по магнитному полю во второй линии появляется ток  $I_M$ . Самое интересное заключается в том, что на ближнем конце токи наводок  $I_{O\Sigma}$  и  $I_M$  синфазны, в то время как на дальнем конце они противофазны. Эти фазовые соотношения показаны на рисунке 5.8.

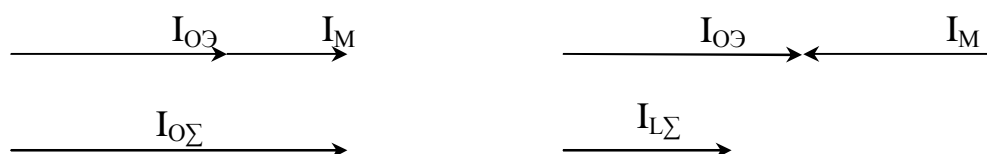


Рисунок 5.8 - Фазовые соотношения между составляющими наводок

На самом деле в многопарных электрических кабелях помимо реактивных составляющих наводки имеют и активные составляющие. Их учет приведет к тому, что фазовые соотношения и векторные диаграммы, приведенные на рисунке 5.8, изменяются. Тем не менее основной вывод останется: наводка на ближний конец будет больше, чем на дальний.

Анализ частотных зависимостей взаимного влияния дает следующие результаты (рисунок 5.9)



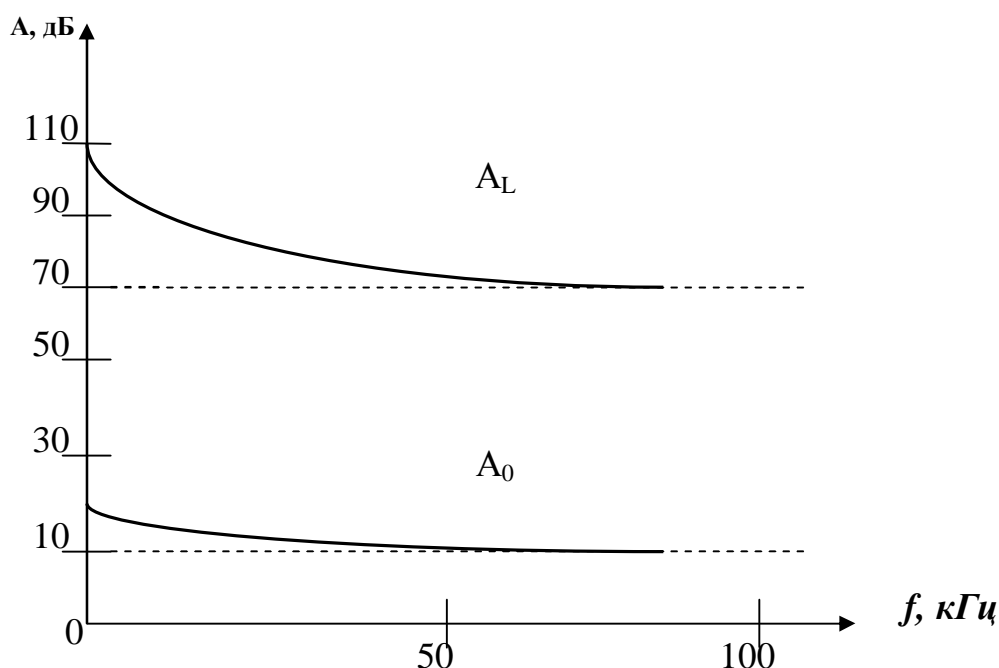


Рисунок 5.9 - Частотные зависимости переходного затухания

Переходное затухание определяется в виде отношения мощности сигнала на входе  $P_{10}$  к мощностям помехи на ближнем  $P_{20}$  и дальнем  $P_{2L}$  концах

$$A_0 = 10 \lg \left| \frac{P_{10}}{P_{20}} \right|$$

$$A_L = 10 \lg \left| \frac{P_{10}}{P_{2L}} \right|$$

Как  $A_0$  так и  $A_L$  уменьшаются с ростом частоты, однако переходное затухание на дальнем конце больше (лучше отношение сигнал – помеха), существенная разница между  $A_0$  и  $A_L$  на рисунке 5.8 объясняется затуханием в линии.

Кроме частотных зависимостей взаимного влияния необходимо знать как меняется соотношение сигнал – помеха от длины линии  $l$ . На рисунке 5.10 приведены типичные зависимости для переходного затухания на ближнем конце  $A_0$  и защищенности

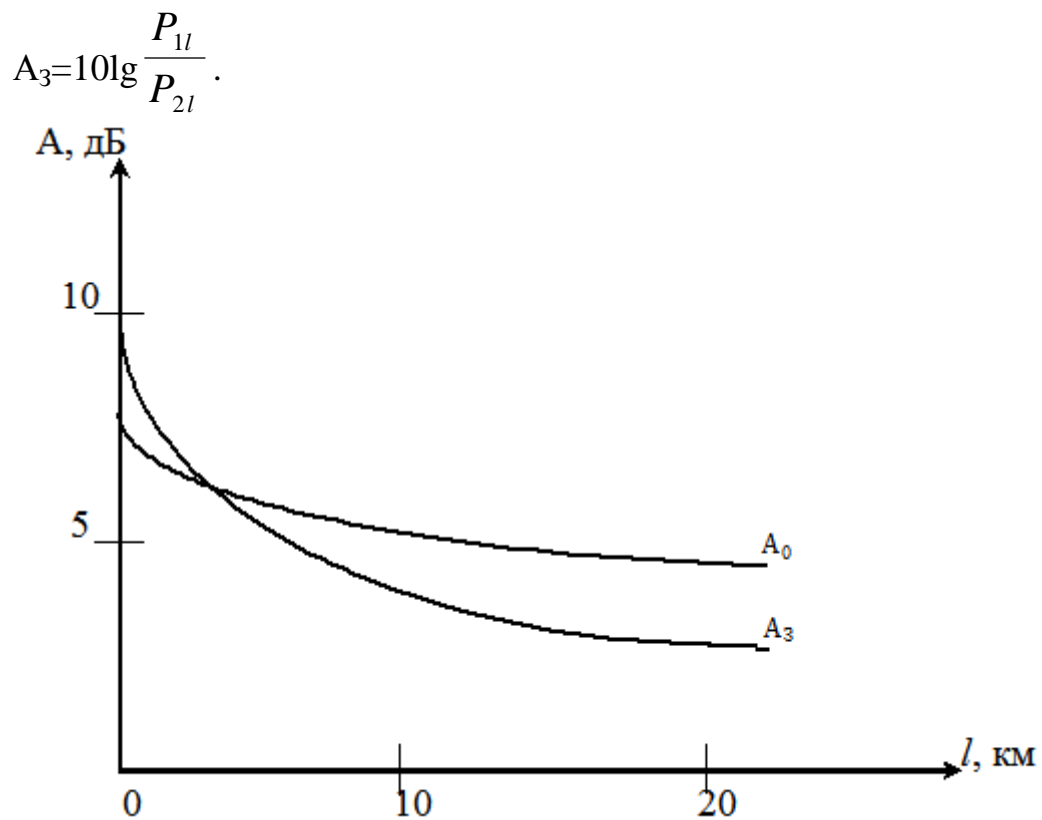


Рисунок 5.10 - Зависимости взаимного влияния от длины линии

Помеха на ближний конец сначала уменьшается, поскольку ее составляющие от разных участков линии приходят с разными фазовыми сдвигами (рисунок 5.11а), а потом стабилизируется.

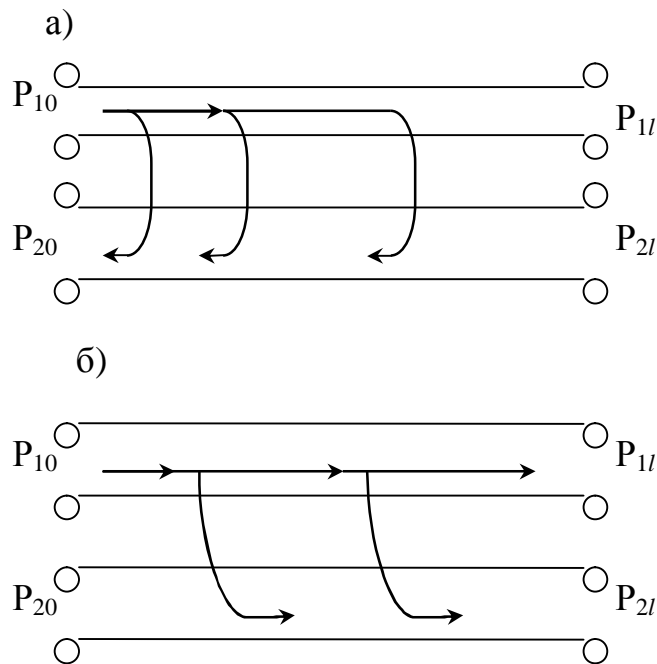


Рисунок 5.11 - Формирование сигналов наводок

При анализе соотношения сигнал – помеха на дальнем конце следует учитывать следующие факторы:

- электрическая и магнитная составляющие наводки находятся в противофазе;
- наводки с разных участков линии накапливаются по ее длине (рисунки 5.11 б);
- сигнал и наводка по мере распространения затухают. Коэффициент затухания, выраженный в децибелах, пропорционален длине линии  $l$ .

Для уменьшения наводок и взаимного влияния жилы в кабелях скручиваются, причем каждая пара может иметь свой шаг скрутки  $d$ , который составляет 150 – 800 мм в зависимости от типа кабеля.

Существенное влияние на первичные и вторичные параметры кабелей, на их нормальное функционирование оказывают условия их эксплуатации. Вследствие нарушения герметичности оболочки происходит увлажнение сердечника кабеля и это ведет к увеличению проводимости среды, увеличению собственной емкости и взаимных емкостей. Увеличивается затухание в линии, изменяется волновое сопротивление, возрастают взаимные влияния между парами.

Приведем технические характеристики некоторых кабелей (таблица 5.2): телефонных кабелей для городских телефонных сетей с пластмассовой изоляцией ТПП, кабелей для сельской связи КСПП

Таблица 5.2 Характеристики многопарных кабелей

Тип кабеля	Диаметр провода, мм	$R_0$ , Ом/км	$C$ , нФ/км	$\alpha$ , дБ/км	$Z_B$ , Ом
ТПП	0.4	139	45	1.54	1164
	0.7	45	45	0.88	676
КСПП	0.9	56.8	38	-	130
	1.2	31.6	43	-	113

Кабели для компьютерных сетей:

- Не экранированная витая пара третьей категории UTP – 3, содержит 4 пары проводов. Шаг скрутки – девять витков на метр. Скорость передачи данных до 10 Мб/с;
- Не экранированная витая пара пятой категории UTP – 5.

Волновое сопротивление в диапазоне частот до 100 МГц – 100 Ом. Величина перекрестных наводок более – 74 дБ на частоте 150 кГц и – 32 дБ на частоте 100 МГц. Затухание меняется от 0.8 дБ до 22 дБ в диапазоне частот 50 кГц – 100 МГц на длине 100 м. Активное сопротивление кабеля 0.1 Ом/м, а емкость 0.056 нФ/м.

### 5.3 Коаксиальные кабели

Основной недостаток симметричного кабеля – способность излучать и принимать излучение внешних источников, преодолен в коаксиальном кабеле (рисунок 5.12).

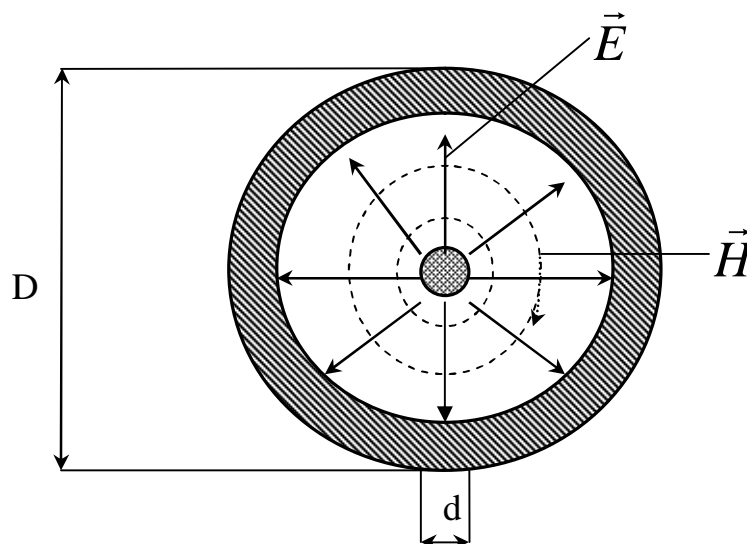


Рисунок 5.12 - Поперечное сечение коаксиального кабеля

Здесь электромагнитное поле заключено в пространстве между двумя коаксиальными проводниками и его связь с внешним пространством в случае идеальных проводников исключена.

Центральный проводник обычно изготавливается из медной проволоки с диаметром  $d$  большим, чем у симметричного кабеля. Этот проводник покрыт слоем пенистого пластикового изолирующего материала, который окружен вторым проводником, обычно плетеной медной сеткой или алюминиевой фольгой.

Основным типом колебаний (модой) коаксиального кабеля является поперечная электромагнитная волна (ТЕМ). Структура поля этой волны приведена на рисунке 5.11. Основные характеристики ТЕМ волны:

- фазовая скорость и постоянная распространения описываются теми же выражениями (5.1) – (5.3), что и для симметричной линии. В случае малой проводимости  $\sigma$  можно считать, что они практически не зависят от частоты;
- волновое сопротивление кабеля выражается через волновое сопротивление диэлектрической среды  $Z_T$  (5.4) и значения диаметров проводников

$$Z_B = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot Z_T \cdot \ln \frac{D}{d} \quad (5.5)$$

В коаксиальных кабелях  $Z_B$  равняется либо 50 Ом (сплошной диэлектрик), либо 75 Ом (комбинированная изоляция).

– Затухание в основном определяется потерями в проводниках. Коэффициент затухания (в дБ/км)

$$\alpha = \frac{2.6\sqrt{f \cdot \varepsilon}}{D \cdot \ln \frac{D}{d}} \cdot \left(\frac{D}{d} + 1\right), \quad (5.6)$$

где  $f$  измеряется в МГц, а диаметры проводников в м.

Из этого выражения следует, что затухание возрастает с ростом частоты  $f$  вследствие поверхностного эффекта, уменьшается с ростом  $D$  и нелинейно зависит от отношения диаметров  $D/d$ .

Последнее обстоятельство позволяет оптимизировать коэффициент затухания по параметру  $\frac{D}{d}$ . Оптимальное соотношение  $(\frac{D}{d})_{\text{опт}}=3.6$  при одинаковых проводниках. При этом выражение (5.6) преобразуется в

$$\alpha = \frac{21.6 \cdot \sqrt{f \cdot \varepsilon_r}}{D} \cdot 10^{-3} \quad (5.7)$$

При типичных значениях параметров  $D=9.6$  мм,  $\varepsilon_r=1.22$  и  $f=100$  МГц получим  $\alpha=25$  дБ/км.

Помехоустойчивость коаксиального кабеля к внешним излучениям определяется его экранирующими свойствами. На рисунке 5.13 приведена зависимость напряженности магнитного поля в коаксиальном кабеле от текущего радиуса  $r$ . Здесь поле за пределами кабеля определяется суммой полей, создаваемых токами  $\pm I$ , протекающими по внутреннему и внешнему проводникам в разных направлениях. Высокая степень защищенности, которая возрастает с частотой, определяет основные преимущества коаксиального кабеля перед симметричным: широкий частотный диапазон, который достигает частоты 100 МГц для магистральных и зональных сетей связи и 1000 МГц для сетей кабельного телевидения. Вследствие этого реализуется большое число одновременно передаваемых каналов телевидения.

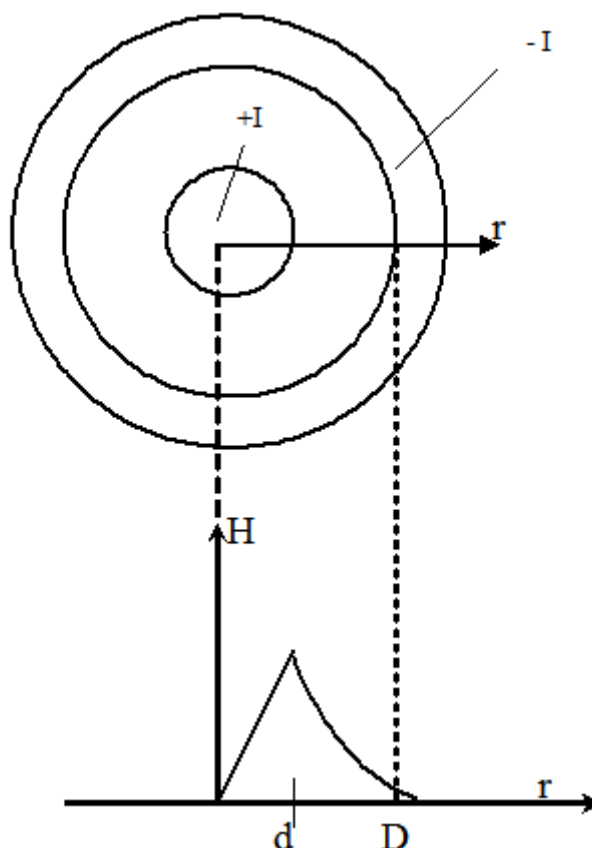


Рисунок 5.13 - Магнитное поле коаксиального кабеля

Несмотря на значительные преимущества коаксиального кабеля перед симметричным область его применения значительно сужена в основном сетями доступа кабельного телевидения. Это объясняется тем что на магистральных сетях коаксиальный кабель существенно уступает волоконно – оптическому по всем техническим характеристикам, в то время как по стоимости он ненамного дешевле. На сетях доступа телефонной связи и сетей передачи данных в настоящее время доминирует симметричный кабель, который значительно дешевле коаксиального и уже проложен в основных районах проживания людей. С развитием интерактивных мультисервисных телекоммуникационных сетей роль коаксиального кабеля вероятно будет возрастать в силу его широкополосности. Однако не исключено, что и в сетях доступа также будет вытеснен волоконнооптическим кабелем.

#### 5.4 Волоконнооптические кабели

Оптический кабель представляет из себя скрученные оптические волокна ( 4 – 32 штуки ) из кварцевого стекла. В них используется явление полного внутреннего отражения. Работают волокна в инфракрасном диапазоне при длине волны  $\lambda = 0.85 - 1.6$  микрон. Этим длинам волн соответствует диапазон частот 170 – 350 Терагерц или ( 1.7 – 3.5 )  $10^5$  ГГц. Чрезвычайно малая длина волны и чрезвычайно высокие зна-

чения несущей частоты и определяют уникальные возможности оптических волокон для передачи информации.

Действительно, высокие значения несущей частоты позволяют передавать сигналы с полосой частот 1 – 10 ТГц и более. Это соответствует длительности импульсов 0.1 – 1 пикосекунды или пропускной способности канала связи 1000 – 10000 Гбит/с. Конечно, такие потенциальные возможности оптических линий связи не так просто реализовать в полной мере, но даже небольшая доля от потенциальной пропускной способности дает таким линиям связи громадные преимущества.

В радиоэлектронике, связи волновые процессы, как правило реализуются в устройствах, размеры которых соизмеримы с длиной волны. Не являются исключением и оптические волокна. Для достижения предельных характеристик размеры поперечного сечения волокна должны не превышать  $(3 - 4) \lambda$ . С одной стороны, это создает трудности при изготовлении волокон, с другой существенно минимизирует поперечные размеры линий связи, поскольку размеры оптических передатчиков и приемников должны быть согласованы с сечением оптического волокна. Малые размеры волокон позволяют размещать их в одном оптическом кабеле десятками и сотнями.

Основной элемент оптического кабеля – волоконный световод – тонкое двухслойное цилиндрическое волокно. Оно состоит из сердцевины и оболочки с разными показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$  (рисунок 5.14)

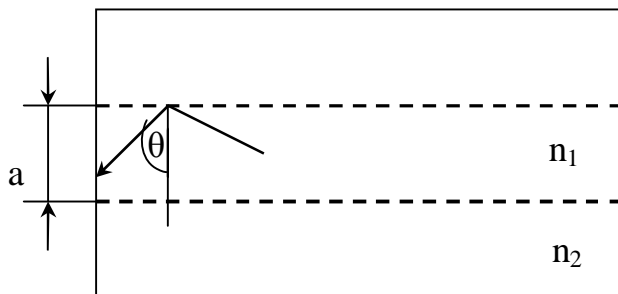


Рисунок 5.14 - Продольное сечение оптического волокна

Так как  $n_1 > n_2$ , то при углах больше угла полного внутреннего отражения  $\theta_v$  ( $\sin \theta_v = \frac{n_2}{n_1}$ ), оптические лучи полностью отражаются от границы раздела двух сред.

Оптическое волокно может обойтись и без оптической оболочки. При этом показатель преломления воздуха  $n_2=1$  и условия полного внутреннего отражения будут выполняться даже в большем диапазоне углов  $\theta$ . Однако на практике оптическое волокно должно быть изолировано от других волокон и защищено от внешней среды. Обычно в качестве защитной оболочки применяют полимерные материалы. У этих материалов оптические свойства (показатель преломления и коэффициент затухания) существенно отличаются от характеристик волокна и усло-

вия полного внутреннего отражения нарушаются. Поэтому в качестве развязки и вводят оптическую оболочку. Если переход от области с показателем преломления  $n_1$  к  $n_2$  происходит резко, то волокно называют ступенчатым.

Изготовление двухслойного оптического волокна не представляет больших проблем. В процессе получения оптической заготовки кварцевого стекла из газовой среды кремния и кислорода в газовую смесь добавляют компоненты, которые при осаждении на цилиндрическую поверхность металлической трубки меняют показатель преломления стекла. Эти изменения не столь значительны. Например,  $n_1=1,465$ , а  $n_2=1,46$ . Этого, однако, достаточно для реализации явления полного внутреннего отражения при углах  $\theta > 85^\circ$ .

Оптические волокна делятся на одномодовые и многомодовые. Согласно волновой теории оптических волноводов в них может распространяться несколько типов колебаний (мод), отличающихся друг от друга структурой электрического и магнитного поля, значением фазовой скорости и волнового сопротивления. Условие существования только одной моды:

$$\frac{2\pi a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\lambda} < 2,405.$$

Для типичного случая  $n_1=1,5$  и  $n_2=1,49$ , максимальное значение диаметра сердцевины  $2a$  равно 6,8 мкм при длине волны  $\lambda=0,85$  мкм и 12,8 мкм при  $\lambda=1,6$  мкм.

Одномодовый и многомодовый режим можно приближенно интерпретировать и в рамках лучевой теории (рисунок 5.15)

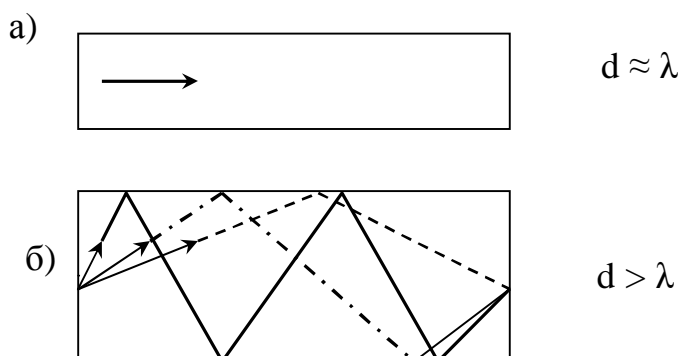


Рисунок 5.15 - Одномодовый (а) и многомодовый (б) режимы передачи.

Здесь в многомодовом режиме для одного сигнала существует несколько одновременно распространяющихся лучей света, которые проходят путь в волокне за разные интервалы времени.

Излучение оптического передатчика (светодиода или лазера) вводится в волокно, как правило, с торца (рисунок 5.16)



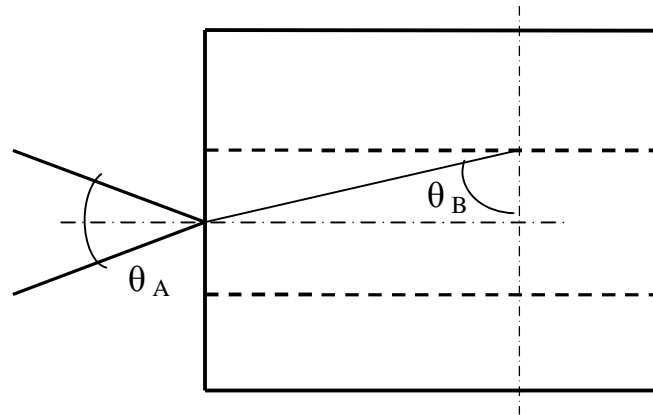


Рисунок 5.16 - Ввод излучения в волокно

Телесный угол  $\theta_A$ , связанный с углом полного внутреннего отражения  $\theta_B$  определяет пучок лучей, которые будут распространяться в волокне. Для описания процессов ввода излучения и возникновения различных мод вводится понятие числовой апертуры

$$NA = \sin \theta_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (5.8)$$

и нормированной частоты

$$V = \frac{2\pi a \sqrt{k_1^2 - k_2^2}}{\lambda} \quad (5.9)$$

Одномодовый режим реализуется при  $V \leq 2,405$ , а число мод возникающих в ступенчатом волноводе

$$N = \frac{V^2}{2}$$

Из приведенных выражений видно, что число мод в волноводе пропорционально  $\left(\frac{a}{\lambda}\right)^2$ .

Одновременное возникновение и распространение нескольких мод существенно снижает пропускную способность волоконно-оптической линии связи. Если обратиться к рисунку 5.15б, то нетрудно увидеть, что разные лучи, возбужденные коротким импульсом с длительностью  $\tau_{вх}$  проходят в волокне разный путь и, следовательно, приходят к фотоприемнику с разными задержками. При этом длительность выходного импульса  $\tau_{вых}$  существенно увеличивается. Это явление называют модовой дисперсией и характеризуют уширением  $\tau_{мод}$

$$\tau = \sqrt{\tau_{вых}^2 - \tau_{вх}^2}$$

Модовое уширение тем больше, чем больше число мод  $N$  и длина линии связи. Величина уширения импульса за счет модовой дисперсии ступенчатого кабеля достигает 20 – 50нс/км.

Одним из способов борьбы с уширением импульса за счет модовой дисперсии является применение градиентных волноводов (рисунок 5.17).

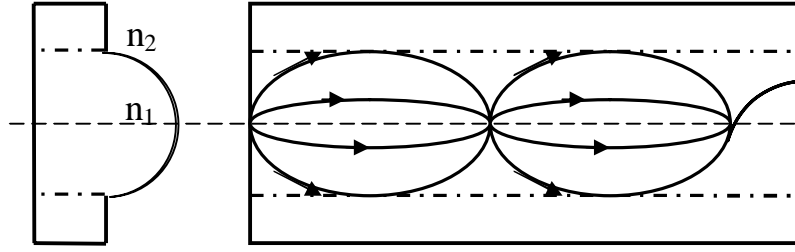


Рисунок 5.17 - Градиентный оптический кабель.

Здесь показатель преломления сердцевины уменьшится плавно от центра от максимального значения  $n_1$ . Чаще всего применяется параболический профиль

$$n = n_1[1 - 2\Delta(r/a)^2]^{1/2}, \quad (5.10)$$

$$\text{где } \Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

В этом случае траектория лучей становится искривленной, причем лучи с меньшими углами  $\theta_A$  идут ближе к оси волокна, где оптическая плотность больше. Поэтому оптическая разность хода разных мод становится меньше чем у ступенчатого волновода. Вследствие этого уменьшается число мод (примерно в два раза) и уширение импульса  $\tau_{\text{мод}}$  (примерно в 10 – 20 раз).

Наряду с модовой дисперсией в оптических волноводах (волокнах) существует и хроматическая дисперсия. Она определяется зависимостью скорости оптических волн от частоты.

$$v_{\text{фаз}} = \frac{v_{\text{св}}(\omega)}{n(\omega)}$$

Числитель в этом выражении характеризует зависимость скорости каждой отдельной моды от частоты (волноводная дисперсия), а знаменатель частотную зависимость показателя преломления среды сердцевин (материальная зависимость).

Результирующее значение уширения импульсов за счет модовой  $\tau_{\text{мод}}$ , волноводной  $\tau_{\text{ВВ}}$  и материальной  $\tau_{\text{мат}}$  дисперсией будет

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{мод}}^2 + \tau_{\text{мат}}^2 + \tau_{\text{ВВ}}^2}$$

Для многомодовых волноводов решающий вклад в уширение импульса вносит модовая дисперсия, которая может быть рассчитана по следующим формулам:

$$\tau_{\text{модст}}^2 = \Delta n_1 \frac{\sqrt{\ell \ell_c}}{c} \quad (5.11)$$

$$\tau_{\text{модгр}} = \Delta n_2 \frac{\sqrt{\ell \ell_c}}{2c} \quad (5.12)$$

где  $\ell$  - длина линии,

$$\ell_c = \begin{cases} 5-7 \text{ км} & \text{для ступенчатого волновода} \\ 10-15 \text{ км} & \text{для градиентного волновода} \end{cases}$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

Таким образом, пропускная способность градиентного волокна в  $2/\Delta$  раз больше, чем у ступенчатого, и разница может составить два порядка.

В одномодовом волокне модовая дисперсия отсутствует, а материальная и волноводная дисперсия имеют различные частотные зависимости, такие, что на длине волны  $\lambda = 1,35 \text{ мкм}$  результирующее уширение импульса близко к нулю. В этом случае можно обеспечить передачу очень коротких импульсов (до 10 пс) и высокую пропускную способность (до 100 Гб/сек).

Уникальные пропускные и дисперсионные свойства оптических волокон могут реализоваться только в том случае, если материал волокна (кварцевое стекло) будет обладать малыми потерями, связанными с поглощением и рассеянием света. В рабочем частотном диапазоне ( $\lambda = 1 - 2 \text{ мкм}$ ) решающий вклад в затухание вносит поглощение на различных примесях, которое носит резонансный характер. Частотная зависимость затухания волокна, в котором состав примесей существенно уменьшен, приведена на рисунке 5.18.

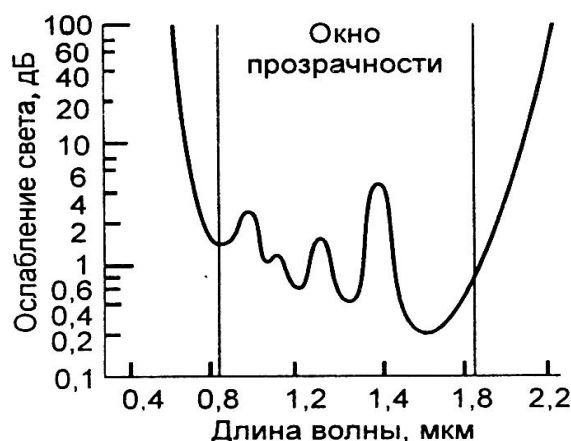


Рисунок 5.18 - Зависимость ослабления света в кварцевом волокне от длины волны

Здесь оставшиеся примеси (ионы гидроксильных групп ОН) вызывают резонансное поглощение света на длинах волн 0,45; 1,24; 1,34 мкм. Между этими участками есть окна прозрачности, наиболее интересными из которых являются окна при  $\lambda = 1,3 \text{ мкм}$ ,  $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$ . Наименьшее затухание (до 0,3 дБ/км) и наибольшая дальность связи (до 100 км) достигается при работе линии связи на  $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$ . Однако длина волны

$\lambda=1.3$  мкм тоже уникальна тем, что для нее минимум затухания (0.7 – 1 дБ/км) совпадает с минимумом уширения импульса. Поэтому в сочетании параметров “дальность действия – пропускная способность” эта длина волны также получила широкое применение.

## 6 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ В ЦИФРОВЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ

### 6.1 Коммутация каналов и коммутация пакетов

При распределении цифровых потоков преимущественно используются две технологии коммутации:

1. **Коммутация каналов (КК).** Здесь (рис. 6.1) между двумя абонентами с помощью цифровых коммутационных устройств устанавливается непосредственное физическое соединение по сквозному каналу, проходящему через узлы ABCD. На время этого постоянного соединения весь ресурс первичного канала закрыт для других абонентов. В каждом узле расположен цифровой коммутатор, функции которого сводятся к следующим двум процедурам (рисунке 6.2):

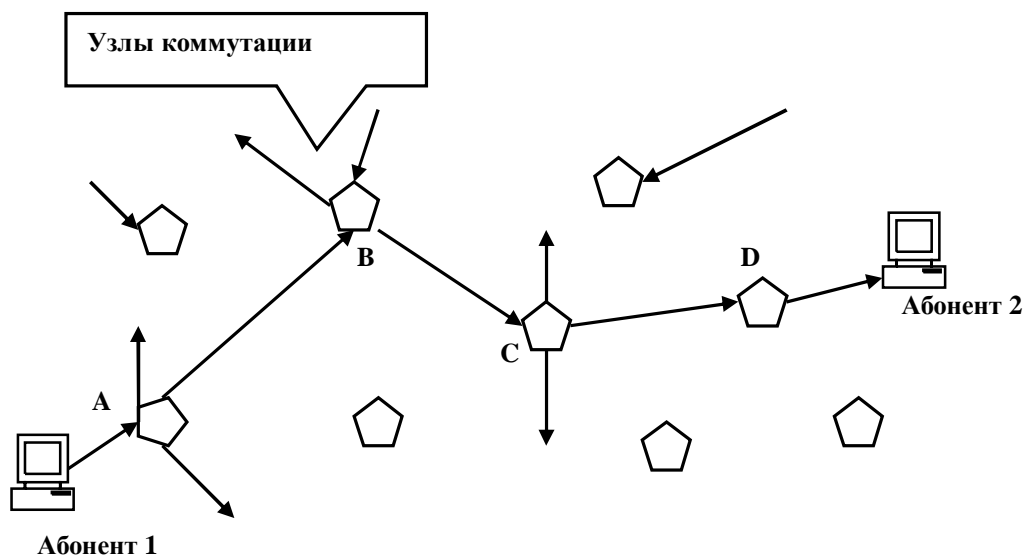


Рисунок 6.1 - Коммутация каналов

- цифровой поток с одного входного порта коммутатора перенаправляется на один из  $M$  выходных портов – случай пространственной коммутации;
- в пределах одного цифрового потока меняется временное положение канальных интервалов.

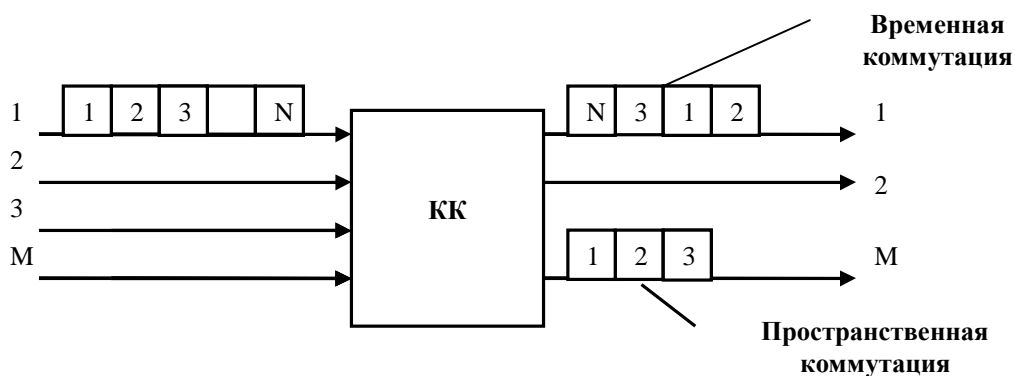


Рисунок 6.2 - Цифровая коммутация

К достоинствам технологии коммутации каналов следует отнести:

- стабильность соединения;
- фиксированная (постоянная) малая задержка сигнала в канале связи, потому что коммутаторы работают с высоким быстродействием. Это способствует высокому качеству передачи речи.

Недостатки способа коммутации каналов:

- низкая загрузка каналов. Поскольку абоненты ведут диалог и занимают дуплексный канал, то 50% времени уходит на то, что один из абонентов молчит, слушая собеседника. Другие потери приходится на паузы и высокую избыточность речи. Общая загрузка канала составляет 10 – 30%;
- отсутствует возможность многоадресной передачи, когда один абонент может сообщить свою информацию целой группе других абонентов.

2. **Коммутация пакетов (КП).** Здесь сообщение сначала преобразуется в цифровую форму, а потом разбивается на части (пакеты). Каждый пакет может передаваться самостоятельно, поскольку в его составе содержится адресная информация пункта назначения. Рисунок 6.3 иллюстрирует один из способов коммутации пакетов (дейтаграммный). Здесь пакеты с номерами 1,2,3,4 поступают на узел коммутации А, который определяет оптимальный (кратчайший) путь ACDB и отправляет по нему пакет 1. При поступлении пакета 2 ситуация в сети изменилась, путь ACDB не обеспечивает быстрого прохождения и узел А отправляет пакет 2 по другому пути (AFDB). К моменту окончания пакета 2 ситуация в сети восстанавливается и пакеты 3,4 снова идут по пути ACDB. Может получиться так, что к узлу В пакеты придут не в той последовательности, в которой были отправлены. Узел В восстанавливает порядок следования пакетов.

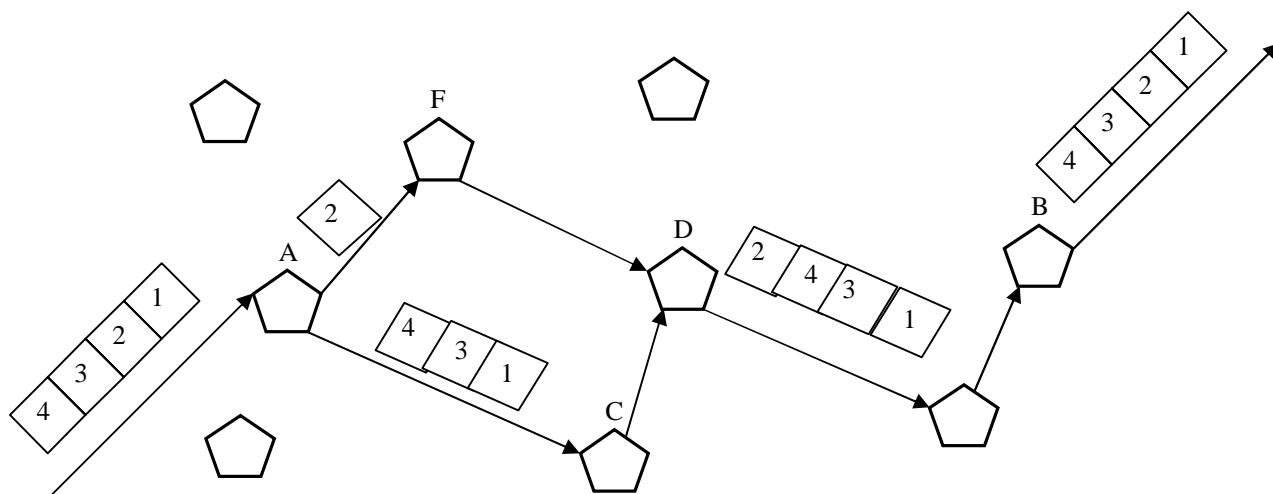


Рисунок 6.3 - Коммутация пакетов

Основные процедуры при передаче пакетов:

- разбиение сообщения на пакеты;
- запись пакетов в узлах;
- маршрутизация пакетов в соседние свободные узлы.

Достоинства технологии коммутации пакетов:

- высокая загрузка канала (до 100%), обеспечивается тем, что любые паузы в сообщении одного абонента могут быть заполнены пакетами информации других абонентов;
- возможность многоадресной передачи, так как в заголовке пакета может содержаться разное количество адресов.

Недостатки способа коммутации пакетов:

- перезапись информации в узлах, что увеличивает задержку передаваемых сигналов;
- переменная скорость передачи и переменная задержка, что также связано с буферизацией информации, ограниченным объемом памяти запоминающих устройств и с возможностью различных путей распространения информации.

На рисунке 6.4 приведена типичная структура пакета. Он ограничен с двух сторон флагами. Чаще всего это комбинация из восьми бит (например, 01111110). Адресное поле содержит информацию об адресах отправителя и получателя. В поле управления указывается тип пакета, его размер и формат, указания по обработке сигнала и т.п.

флаг	адрес	управление	информация	контрольное поле	флаг
------	-------	------------	------------	------------------	------

Рисунок 6.4 - Структура пакета

В информационном поле передаются непосредственно данные, а контрольное поле предназначено для процедуры обнаружения ошибок посредством передачи определенных кодовых комбинаций, которые проверяются на приемном конце.

## 6.2 Пространственная коммутация

Основной функцией коммутатора является установление и разрыв соединения между двумя каналами передачи. Каналы передачи могут идти от коммутатора либо к абоненту, либо к другому коммутатору. Поэтому различают местные соединения и транзитные соединения. Пример местного соединения показан на рисунке 6.5.

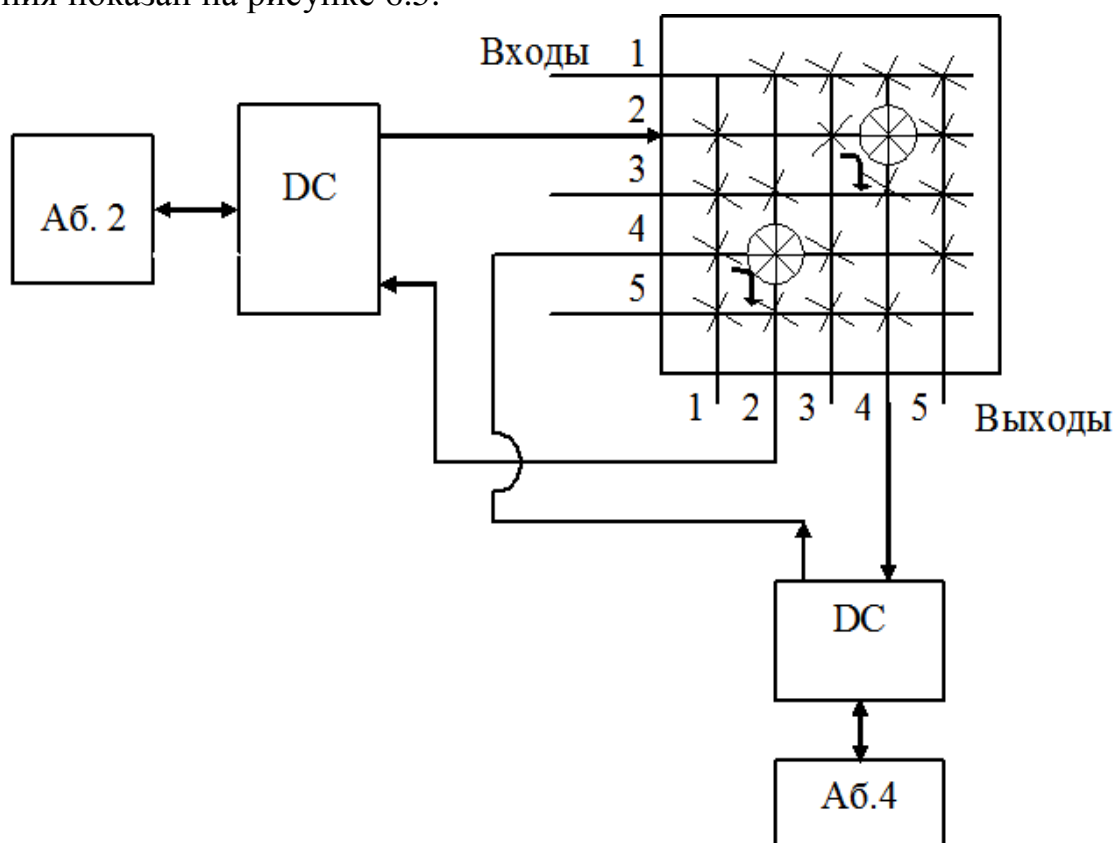


Рисунок 6.5 - Коммутация местного соединения

Здесь коммутационная схема является полnodоступной, так как каждый вход может быть соединен с каждым выходом. В этой схеме предполагается двусторонняя связь, поэтому число входов равно числу выходов и



геометрия схемы – квадрат. Для каждого соединения предполагается две точки коммутации  $i \rightarrow j$  и  $j \rightarrow i$ . Одна из диагоналей квадрата  $i \rightarrow i$  элементы коммутации не содержит. Для каждого абонента предусмотрена дифференциальная система, которая согласует двухпроводное абонентское окончание с четырехпроводным (две двухпроводные линии) на стороне АТС. На рисунке 6.5 приведен пример соединения абонента 2 с абонентом 4. Нетрудно увидеть, что для каждого абонента в схеме используются строка и столбец коммутационной матрицы с одноименным номером.

Полнодоступные коммутационные схемы используются только на небольших АТС с числом абонентов  $N$  не более 1000. Это связано с большим числом необходимых точек коммутации  $N_k$ .

$$N_k = N^2 - N = N(N-1) \approx N^2$$

Если  $N=1000$ , то  $N_k = 10^6$ , а при  $N=5000$   $N_k = 25 \cdot 10^6$ . При таком количестве элементов коммутации сложность и стоимость коммутатора неизмеримо возрастают.

Сократить число коммутационных элементов при большом числе входных линий можно при каскадном включении не полнодоступных коммутационных схем. Примеры таких схем приведены на рисунке 6.6.

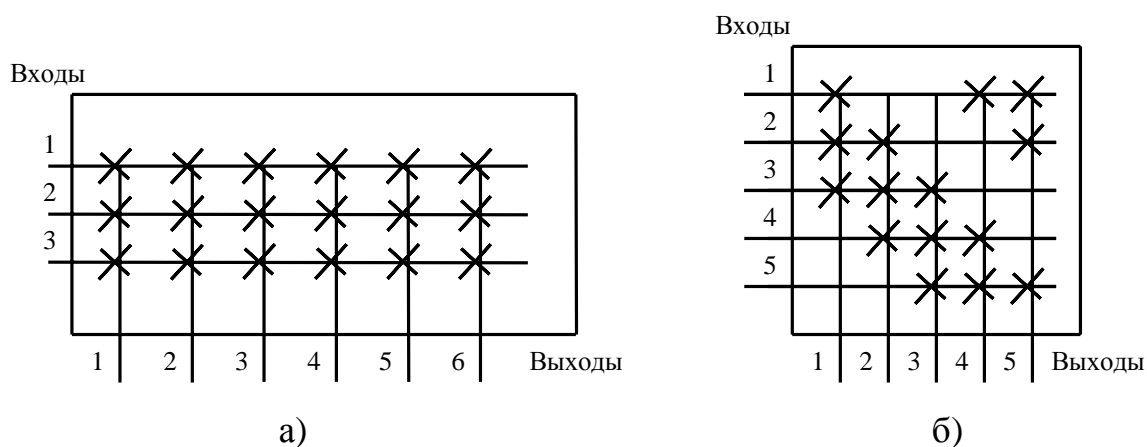


Рисунок 6.6 - Неполнодоступные схемы коммутации

Это схемы, когда число входов неравно числу выходов (рис.6.6а) и, когда в квадратной структуре не все точки содержат коммутационные элементы (рис.6.6б). И в том и в другом случае часть выходов не может быть соединена с частью входов. Наиболее очевидна такая ситуация в схеме рис.6.6б. В прямоугольной решетчатой структуре неполнодоступность возникает так. Входы 1, 2, 3 могут быть соединены с любым из выходов 1 - 6, однако встречный канал может быть организован только для трех выходов из шести. Такая невозможность установления соединения при незанятом абоненте называется блокировкой. В связи с этим коммутационные схемы могут быть не блокирующимися или блокирующимися. Простой пример

неблокирующей схемы – квадратная решетка (рис. 6.5) и блокирующей – прямоугольная решетка (рис 6.6а).

Блокирующиеся схемы применяются в следующих случаях:

- при установлении транзитных соединений;
- в многозвенных коммутационных схемах;
- на удаленных концентраторах.

Во всех этих случаях требование обеспечения возможности установления соединения любого входа с любым выходом не является обязательным. Рассмотрим вначале транзитные соединения (рисунок 6.7).

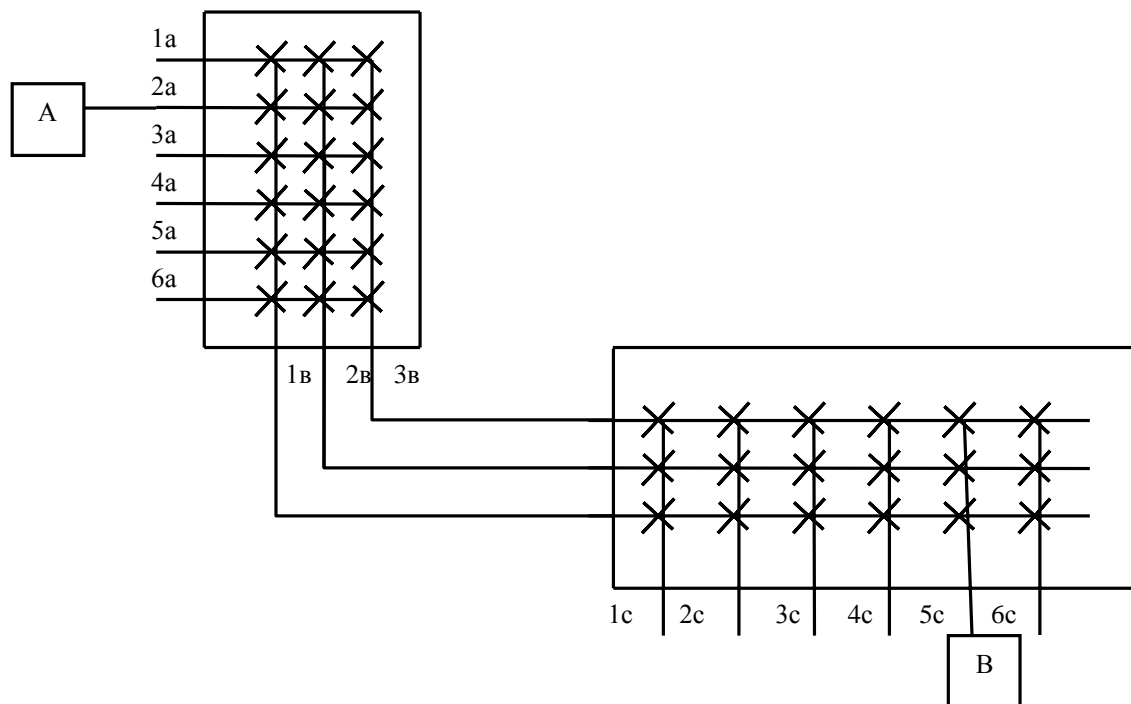


Рисунок 6.7 - Транзитное соединение

Здесь связь абонента А с абонентом В осуществляется через два коммутатора (две АТС), каждый из которых организован по блокирующей схеме. Так как вероятность одновременного обслуживания всех входов 1а – 6а мала, число выходов в первом коммутаторе меньше, чем входов. Все эти выходы подключены к входам второго коммутатора. При этом транзитное соединение А→В может осуществляться по разным траекториям:

2а – 1в – 5с

2а - 2в – 5с

2а – 3в – 5с

Выбор этой траектории определяется управляющими устройствами АТС в зависимости от задействования коммутационных элементов в обеих схемах. При этом при большой нагрузке возможен вариант отказа в услуге, когда все линии, соединяющие АТС (1в, 2в, 3в), заняты трафиком от других абонентов.

Подобные ситуации возникают и в многозвенных коммутаторах, которые будут рассмотрены в разделе 6.3.

Рассмотрим теперь способы реализации коммутационной матрицы. Обычно, в ее узлах стоят электронные управляемые контакты (рисунок 6.8). В качестве таких контактов применялись герконы (герметические контакты) или электронные устройства (диоды, транзисторы). Однако все эти устройства имели недостаточную величину контактного отношения  $\frac{R_k}{R_\infty}$ ,

где  $R_k$  - сопротивление замкнутого контакта, а  $R_\infty$  - сопротивление контакта в разомкнутом состоянии. В настоящее время коммутационные схемы с непосредственными контактами есть только в старых электронных АТС. Им на смену пришли цифровые, в которых состояние коммутации создается логическими процедурами передачи состояния (“и”, “не” и др.).

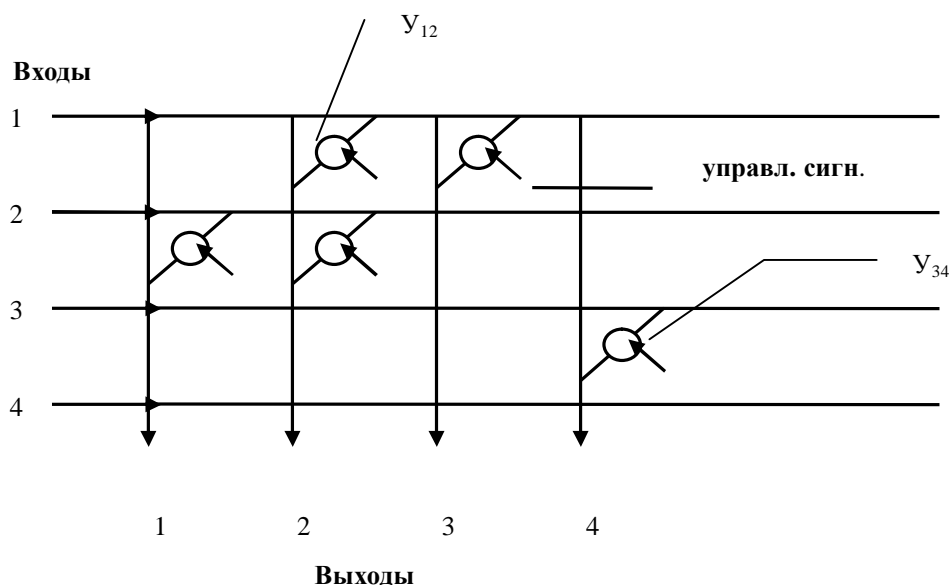


Рисунок 6.8 - Коммутационная пространственная матрица

Поскольку в цифровых системах связи используются преимущественно системы передачи с временным разделением каналов (например ИКМ-30), то и системы коммутации ориентированы на работу с такими сигналами. Алгоритм работы схемы коммутации здесь будет следующим (рисунок 6.9). Предположим, что абонент А занимает на первой входящей линии первый канальный интервал  $КИ_1$  и его надо соединить с абонентом В, который находится на второй исходящей линии. Тогда на коммутационный элемент  $Y_{12}$  надо подать управляющий импульс  $S_{y12}$  длительностью  $\tau_k$  во время первого канального интервала. На выходе 2 в первом канальном интервале появится кодовое слово (байт) абонента А.

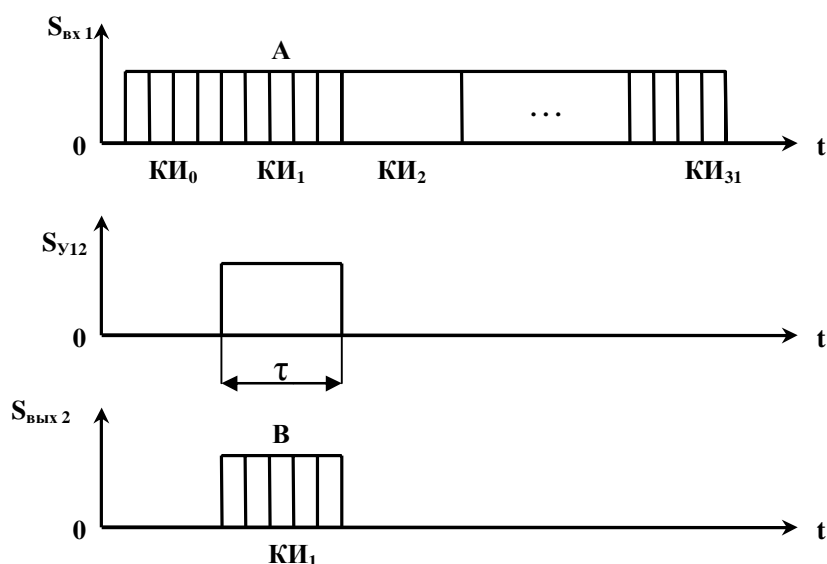


Рисунок 6.9 - Временные диаграммы

Чтобы его получить, абонент В должен считать эту информацию также в  $КИ_1$ . В это время все элементы  $У_{i2}$  второго столбца должны быть разомкнуты. Если абонент С передает свою информацию в  $КИ_3$  третьей входящей линии абоненту Д, находящемуся на четвертой исходящей линии, то управляющий импульс подается на коммутационный элемент  $У_{34}$  во время пятого канального интервала.

Примеры реализации цифровых коммутационных схем приведены на рисунках 6.10, 6.11.

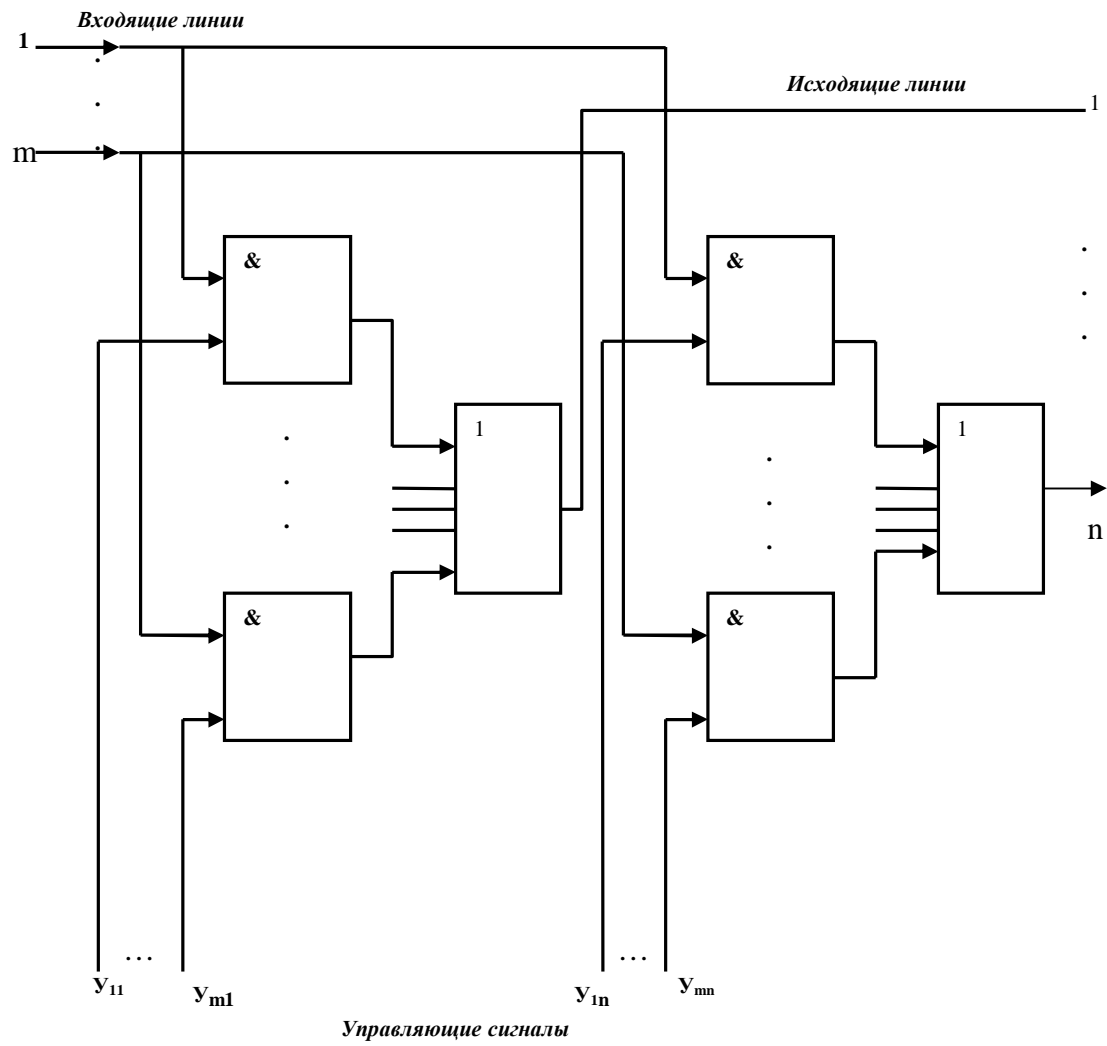


Рисунок 6.10 - Коммутационная схема на электронных ключах

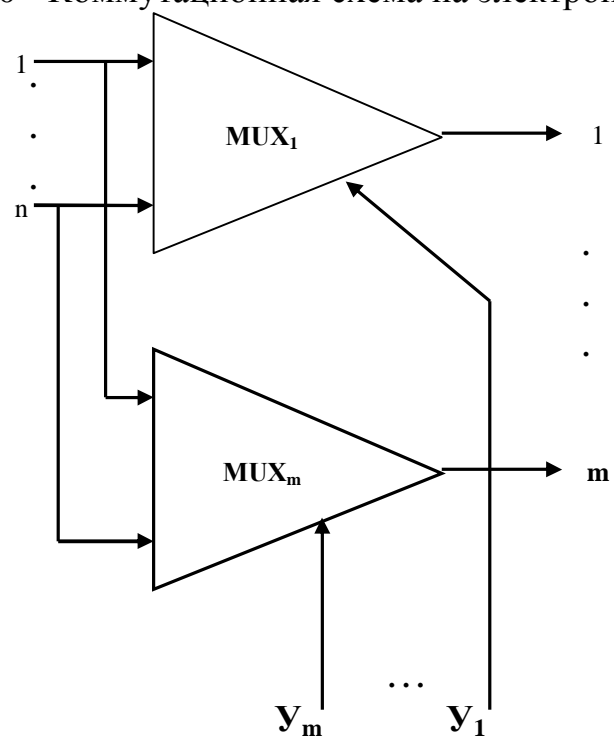


Рисунок 6.11 - Коммутационная схема на мультиплексорах

В коммутационной схеме на электронных ключах на схемы “и” одного столбца подаются входящие цифровые потоки и управляющие сигналы от АТС. При совпадении сигналов во времени схема “и” пропускает соответствующий канальный интервал (8 бит) через схему “или” в одну из исходящих линий. Например, первый канальный интервал из первой входящей линии нужно передать в  $n$ -ую линию. Тогда на схему “и<sub>1n</sub>” во время первого канального интервала должен поступить импульс  $u_{1n}$ , длительность которого равна длительности канального интервала. Нетрудно видеть, что в этой схеме каждой точке коммутации нужен свой управляющий вход и их общее число равно  $m \times n$ . Это усложняет схему.

В коммутационной схеме на мультиплексорах выбор входящей линии, которая переключается на соответствующую выходящую линию, задается кодом. Поэтому число управляющих входов здесь существенно меньше.

### 6.3. Временная коммутация

Как было отмечено в разделе 6.1. временная коммутация имеет место только для цифровых потоков с временным разделением каналов. Здесь в одном цифровом потоке (рисунок 6.12) информация абонента А из второго канального интервала заносится в КИ<sub>30</sub>, которую получает абонент В. Таким образом простейший временной коммутатор содержит одну входную и одну выходную линии.

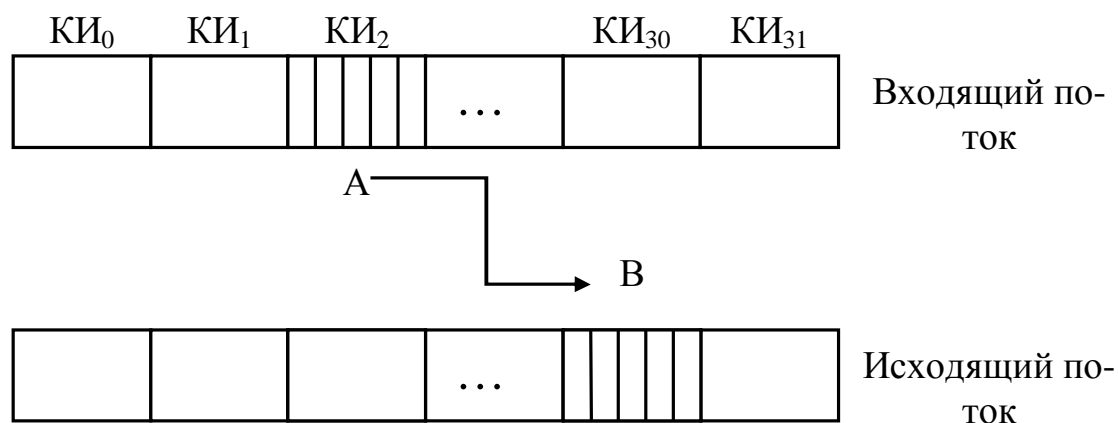


Рисунок 6.12-Принцип временной коммутации

Операция перемещения информации с одной временной позиции на другую реализуется с помощью многоканального запоминающего устройства (ЗУ) (рисунок 6.13). Здесь кодовое слово каждого информационного канального интервала входящего цифрового потока (8 бит) последовательно записывается в 8-битовые ЗУ. После окончания записи начинается этап считывания. По команде управляющего устройства считывание из ячеек ЗУ происходит в другой последовательности.

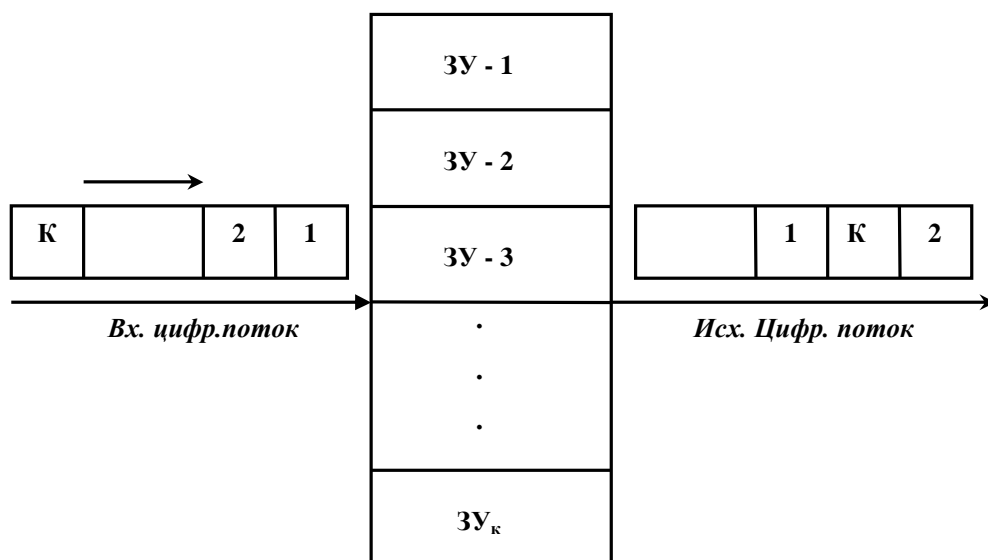


Рисунок 6. 13 - Временной коммутатор на ЗУ

Управляющее устройство также реализуется с помощью запоминающих устройств (УЗУ), в которых содержится информация о номерах входящих и исходящих линий, поступающая от АТС. Проиллюстрируем работу временного коммутатора совместно с УЗУ (рисунок 6.14).

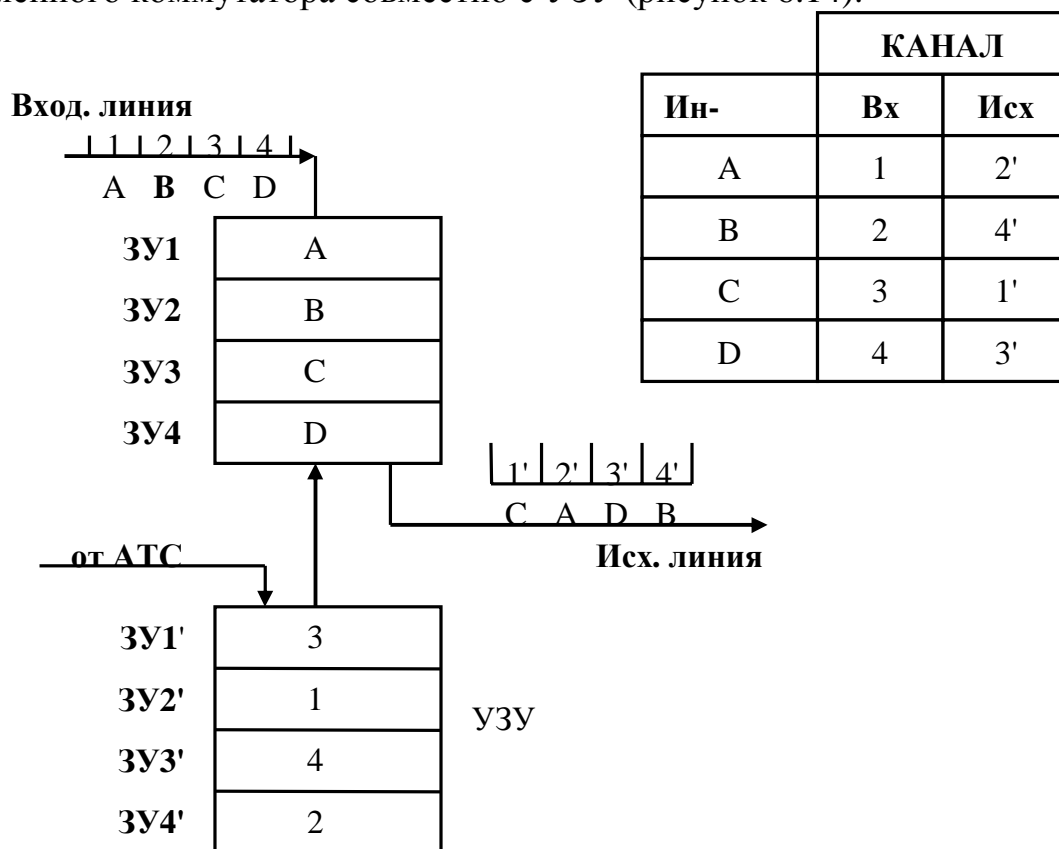


Рисунок 6. 14 - Работа коммутатора с УЗУ

Здесь правило коммутации задается таблицей. Последовательность информации во времени будет CADB. Чтобы ее обеспечить, УЗУ должно выдать команды на считывание в такой последовательности -3142. Эти адреса поступят в УЗУ от АТС, анализирующей сигналы управления и взаимодействия (СУВ) входных цифровых потоков.

Оценим максимальное число временных каналов (канальных интервалов)  $N_k$ , которое можно коммутировать в одном блоке ЗУ. Обращение к каждой ячейке информационного ЗУ (ИЗУ) происходит дважды за цикл: в момент записи и в момент считывания. Если время обращения  $t_0$ , то

$$N_k = \frac{\tau_{\text{ц}}}{2 \cdot t_0}$$

Где  $\tau_{\text{ц}}=125$  мкс – длительность цикла. При  $t_0=0.5$  мкс,  $N_k=125$ .

Такая емкость ЗУ достаточна для цифровой системы передачи ИКМ - 120, работающей в одном направлении или для двух систем ИКМ - 30 в режиме двусторонней передачи. Управляющее ЗУ также содержит  $N_k$  слов, каждое из которых содержит 7-8 бит.

Таким образом, требования к ИЗУ и УЗУ невелики. Их память должна содержать по 128x8 бит  $\approx 1$  кбит. Это несложные и недорогие устройства, которые гораздо проще, чем пространственные коммутаторы на герконах, электронных ключах и мультимплексорах. Поэтому они находят широкое применение в современных коммутаторах.

#### 6.4. Многозвенные системы коммутации.

Однозвенные системы коммутации имеют ряд существенных недостатков.

1. Даже при сравнительно небольшом числе абонентов требуется много точек коммутации. Так при  $N=500$ ,  $N_k=N^2=25 \cdot 10^4$ ;

2. Низкая надёжность. При выходе из строя любого узла коммутации (например,  $Y_{mk}$ ) соединение  $m$ -входной и  $k$ -выходной линий невозможно, как для, временной, так и для пространственной схем коммутации. Резервных путей здесь нет.

3. Большая избыточность. В связи с тем, что загрузка входных и выходных линий всегда значительно меньше 100% большая часть емкости коммутационного поля не задействована.

Поэтому при большом числе точек коммутации  $N_k > 10000$  применяются многозвенные схемы, когда последовательно включаются коммутационные схемы разных типов. Если обозначить через В-звено временной коммутации, а через П-звено пространственной коммутации, то многозвенные системы имеют следующие варианты: В-П; П-В; В-П-В; П-В-П; В-П-В-П-В и др.

Рассмотрим один из самых простых вариантов В-П (рисунок 6.15).



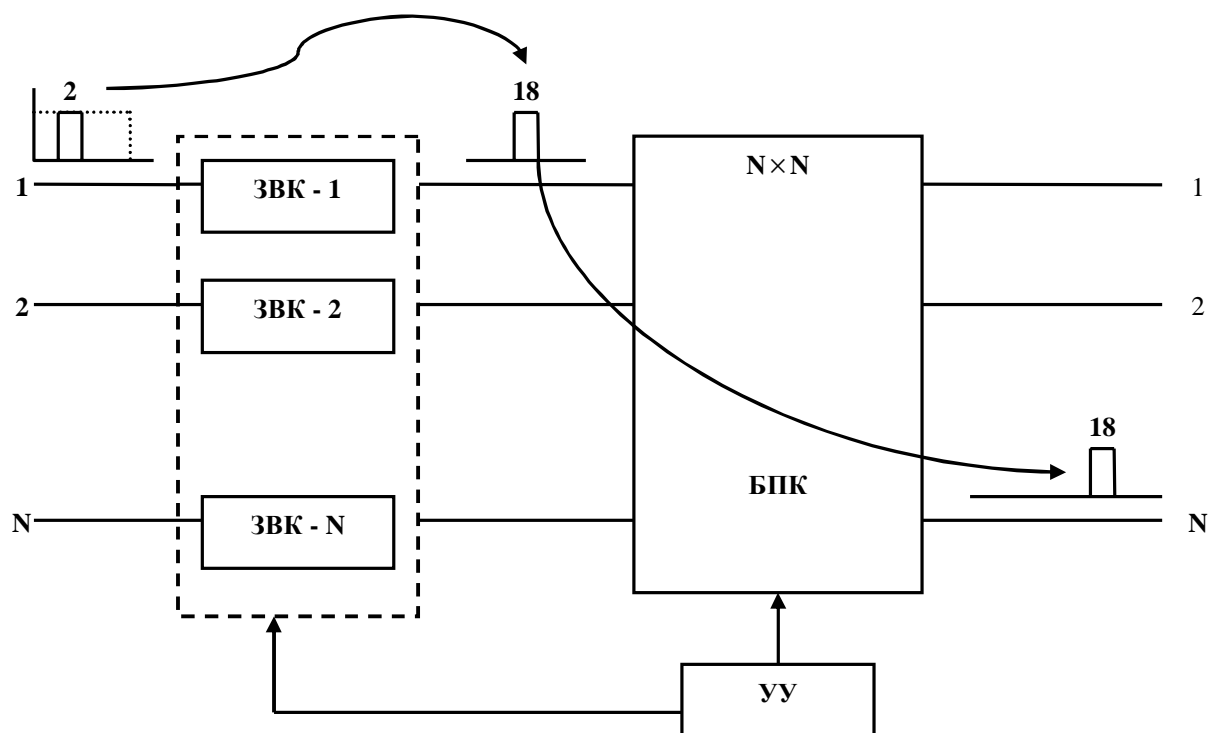


Рисунок 6. 15- Коммутационная схема В – П

Здесь звенья временной коммутации (ЗВК) включены последовательно ко входам блока пространственной коммутации (БПК). В ЗВК происходит временной сдвиг, а БПК осуществляет коммутацию между разноименными входными и выходными линиями без изменения положения канального интервала во времени.

Для схемы В-П для анализа можно ввести пространственный эквивалент (рисунок 6.16).

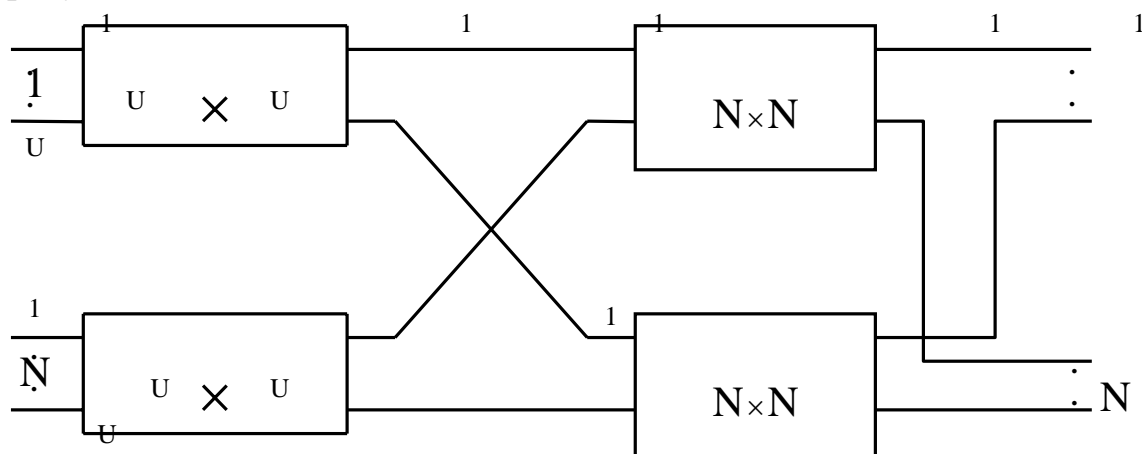


Рисунок 6. 16 - Пространственный эквивалент схемы В – П

Для оценки эффективности многозвенных систем коммутации рассмотрим пространственный эквивалент трехзвенной схемы (П-В-П или В-П-В) (рисунок 6.17)

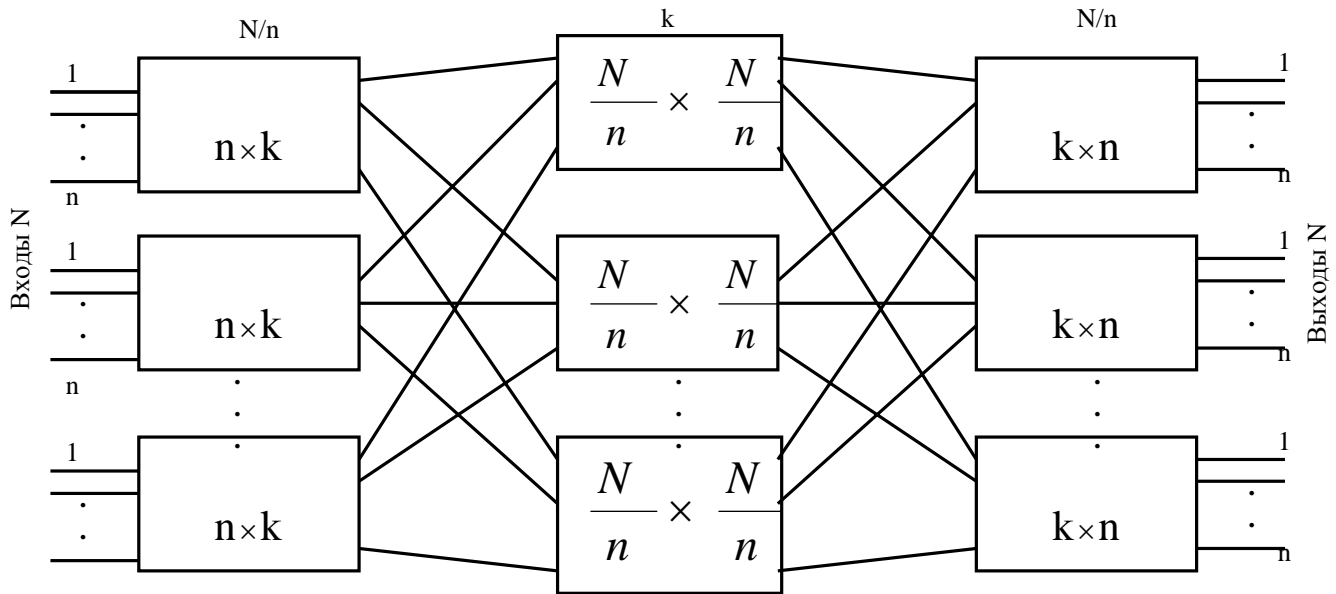


Рисунок 6.17- Трехзвенная система

Здесь  $N$  входов и  $N$  выходов ( $N \times N$ ) разбиты на  $\frac{N}{n}$  групп, каждая из которых коммутируется внутренними устройствами. Их число равно  $k$ . Определим число точек коммутации для такой схемы

$$N_k = 2 \cdot (n \times k) \frac{N}{n} + \left(\frac{N}{n}\right)^2 \cdot k = 2N \cdot k + \left(\frac{N}{n}\right)^2 \cdot k$$

Сравним число точек коммутации для однозвенной и трехзвенной схем при  $N = 100$ ,  $n = k = 10$

$$N_k^{(1)} = 10^4$$

$$N_k^{(3)} = 3 \cdot 10^3$$

Еще больший выигрыш будет при  $N > 100$ .

Из рис 6.17. также видно, что если все внутренние коммутаторы полностью доступны, то любое соединение может быть выполнено  $k$ -путями. Это обеспечивает с одной стороны надежность системы, а с другой указывает на наличие блокировок, так как  $N > k$ .

Структура коммутационной схемы ПВП приведена на рисунке 6.18, а схемы ВПВ на рисунке 6.19.

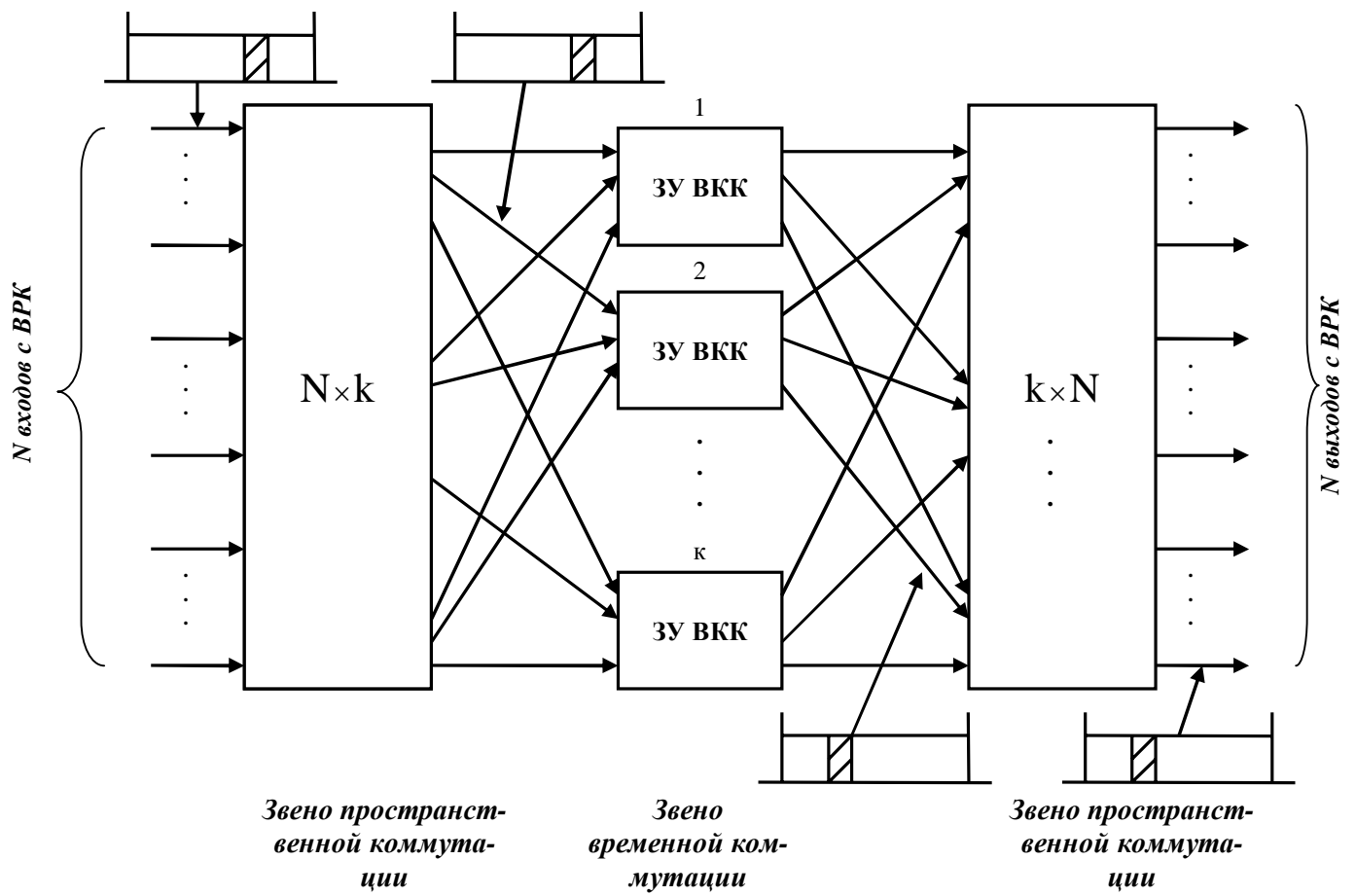


Рисунок 6.18 - Коммутационная схема ПВП

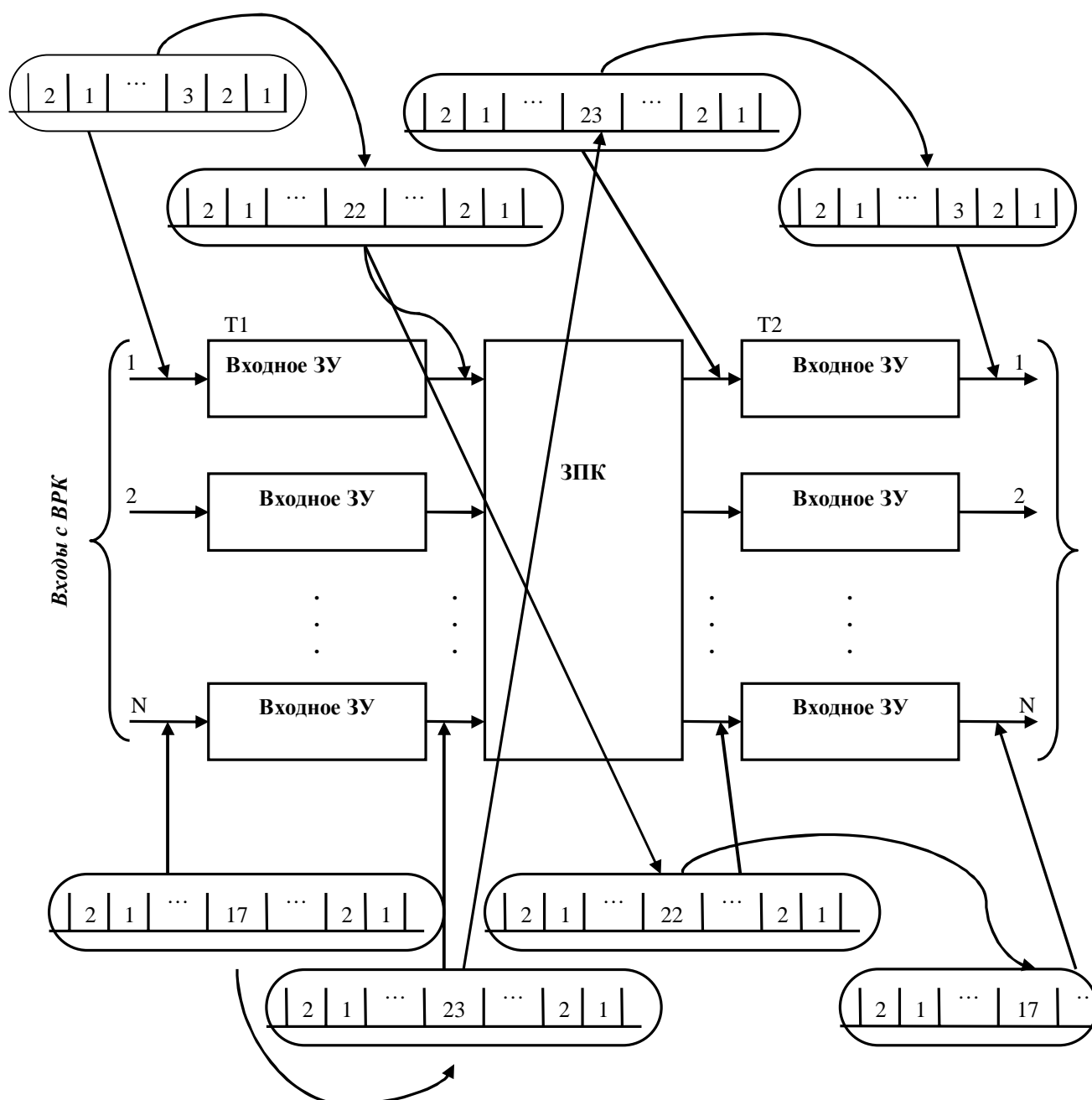


Рисунок 6.19- Коммутационная схема ВП

В заключение данного раздела рассмотрим примерную структуру коммутационной станции (АТС). В ее состав входят (рисунок 6.20): коммутационное поле (КП), система управления (СУ), блок абонентского доступа, блок сетевого доступа, блок передачи данных (ПД), блок управления сигнализацией и модуль технического обслуживания (ТО).

Система управления служит для управления соединением и разъединением, выбора маршрута в коммутационном поле. Блок абонентского доступа содержит интерфейсы для подключения аналоговых (каналы ТЧ) и цифровых (ISDN-BRA, ISDN-PRA) линий. Соответственно блок ПД организует доступ по технологиям с коммутацией пакетов, например Ethernet и xDSL.

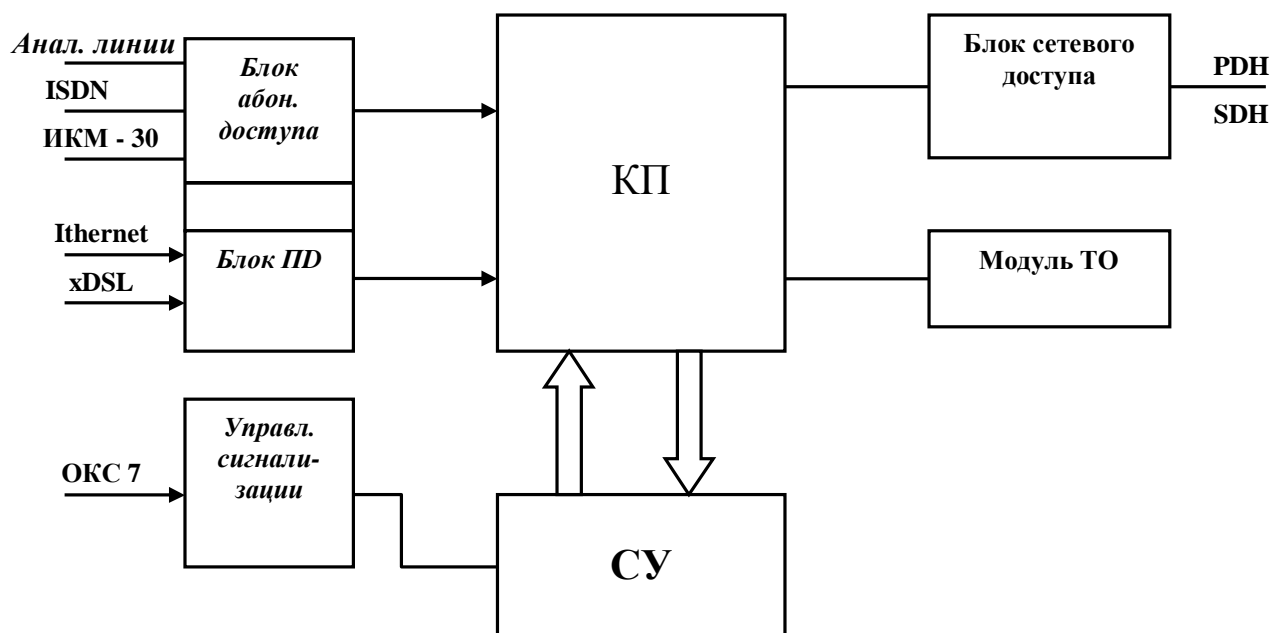


Рисунок 6. 20- Структура коммутационной станции

Для взаимодействия АТС друг с другом посредством соединительных линий служит блок сетевого доступа с технологиями SDH, PDH, ATM, Gigabit Ethernet и др. Наконец, модуль технического обслуживания осуществляет мониторинг состояния и неисправностей станции.

## 6.5 Распределение информации в сетях передачи данных

### 6.5.1 Сети с коммутацией пакетов

Распределение информации в сетях с коммутацией пакетов имеет существенные отличия по сравнению с сетями с коммутацией каналов и характеризуется разнообразием технологий.

Среди наиболее распространенных способов назовём следующие :

- случайный или поочерёдный доступ к общей среде передачи;
- коммутация пакетов с использованием MAC – адресов и таблиц коммутации;
- организация постоянных или временных виртуальных соединений;
- маршрутизация пакетов с использованием адресов сетевого уровня, например IP – адресов.

Рассмотрим эти технологии подробнее. Для того чтобы все устройства, составляющие сеть (компьютеры, серверы, коммутаторы, маршрутизаторы и др.), могли взаимодействовать между собой они имеют аппаратный интерфейс (сетевая карта) и программный интерфейс (драйвер). Сетевая карта вместе со своим драйвером работает на канальном уровне и обеспечивает следующие функции:

- индивидуализация компьютера в сетевом пространстве с помощью уникального MAC – адреса, который присваивается сетевой карте при ее изготовлении. Из 48 бит адреса 22 бита отводятся на идентификацию

фирмы изготовителя, а 24 бита выделяются для нумерации самой карты внутри данного производства. Такой формат адреса позволяет назначить 280 триллионов различных адресов;

- распознавание своего адреса в принимаемых пакетах;
- промежуточное хранение данных и служебной информации в буфере;
- выявление нестандартных ситуаций в сети: конфликты (коллизии), искажение пакетов и др.;
- выявление ошибок;
- преобразование параллельного кода данных от компьютера в последовательный для передачи по линии;
- кодирование и декодирование сигналов к виду, удобному для эффективной передачи (линейное кодирование);

Сетевая карта и MAC адрес – это необходимые элементы для каждой из вышеперечисленных технологий.

### 6.5.2 Множественный доступ с контролем несущей и обнаружением коллизий

Рассмотрим кратко множественный доступ с контролем несущей и обнаружением коллизий МДКН/ОК (рисунок 6.21).

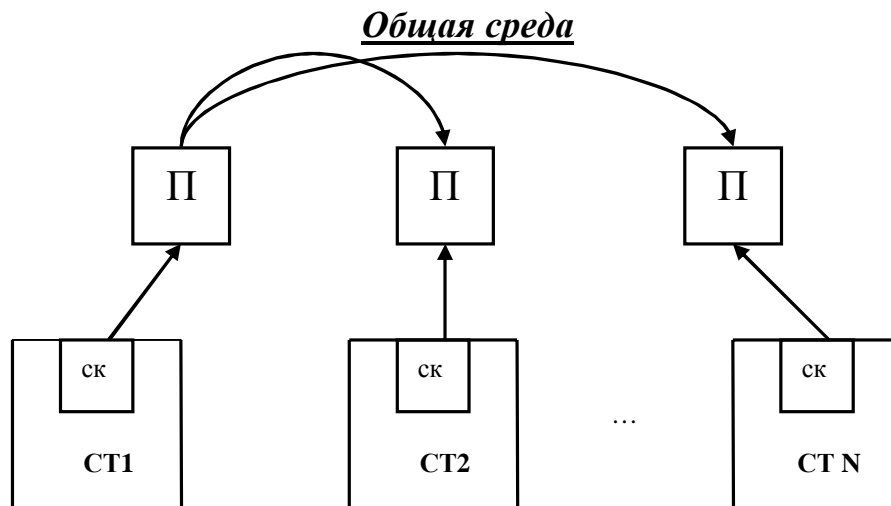


Рисунок 6. 21- Схема случайного доступа к среде

Здесь все абоненты сети ( $СТ_i$ ) подключены к общей среде передачи посредством портов П.

С помощью приемников сетевых карт (СК) они “прослушивают” сеть. Если в сети находится какой-либо сигнал, то станции свои пакеты не передают. Если среда свободна, то станция, готовая к передаче, посылает свои пакеты в произвольный момент времени. Такой случайный доступ к среде чрезвычайно прост и не требует специальной системы управления, однако при этом возникают конфликты (коллизии), когда две станции независимо

одновременно посылают свои пакеты и они накладываются во времени. В этом случае оба пакета искажаются. Станции, обнаружив коллизию, дальнейшую передачу прекращают и вновь передают эти пакеты через некоторый случайный интервал времени. Разумеется, что вероятность возникновения коллизий тем больше, чем больше станций включено в общую среду и чем длиннее пакеты.

Наибольшее распространение к настоящему времени такая технология получила в сетях Ethernet (рисунок 6.22).

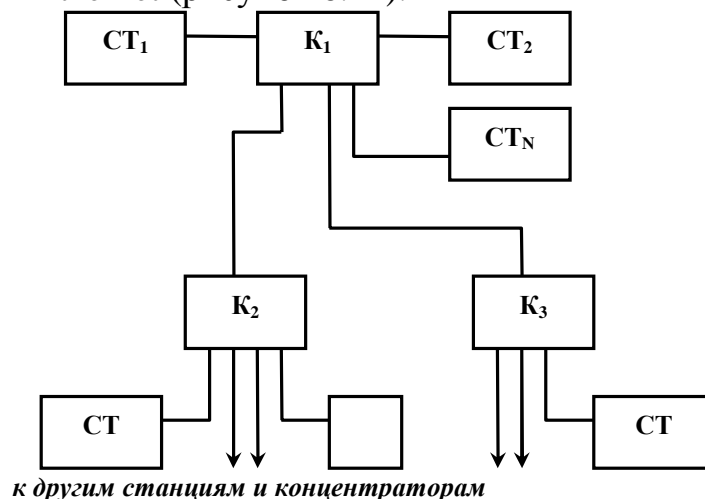


Рисунок 6. 22 - Схема сети Ethernet на концентраторах (хабах)

Здесь роль общей среды играют концентраторы  $K_i$  и линии их соединяющие. Концентратор (хаб) – это многопортовый повторитель, обладающий тем свойством, что сигнал, принятый приемником  $R_x$  одного из портов повторяется на выходе передатчиков  $T_x$  всех других портов (рисунок 6.23) за исключением собственного.

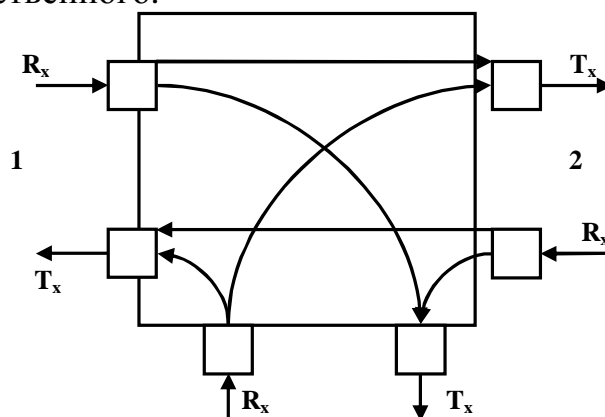


Рисунок 6. 23 - Принцип работы концентратора

Концентраторы могут включаться каскадно, образуя древовидную структуру сети.

Стандарты технологии Ethernet имеют много разновидностей. Основные характеристики стандартов следующие:

**10 Base-T.** Скорость передачи битов – 10 Мбит/с. Максимальный размер пакета – 12203 бит, а минимальный – 576. Физическая среда передачи – по две витых пары на каждый порт. Общее количество станций в сети не более 1024. Максимальное расстояние между станцией и хабом (длина сегмента) 100м, а между любыми двумя станциями (диаметр сети) 500м. Последнее условие необходимо для того, чтобы при минимальном размере пакета станции могли бы обнаружить коллизию до того, как закончится передача пакета.

100 Base-T, 100 Base-F, скорость передачи битов – 100 Мбит/с., физическая среда передачи: витая пара (Т) и оптическое волокно (F). Длина сегмента для витой пары – 100м., для волокна – 136м., а диаметр сети не превышает 260м.

### 6.5.3 Сети с коммутацией пакетов

Более совершенным, но и более сложным способом построения сетей является коммутация пакетов. Рассмотрим коммутацию в сетях Ethernet (рисунок 6.24).

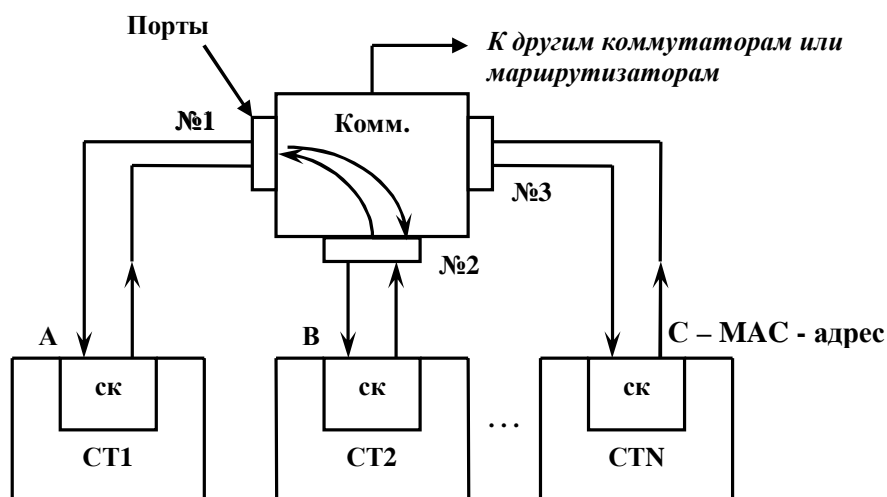


Рисунок 6. 24 - Построение ЛВС на основе коммутатора

Основное отличие от сети на концентраторах заключается в том, что вместо них применены коммутаторы. В то же время все физические интерфейсы, размеры и формат кадра остались такими же, как и в классическом Ethernet.

Коммутатор Ethernet работает на канальном уровне на основе внутренней таблицы, связывающей порты коммутатора с MAC адресами, подключенных к ним устройств. Пусть, например, станция 1 с MAC адресом А посылает пакет к станции 2 с MAC адресом В. Коммутатор принимает пакет на порт №1 и анализирует адрес получателя. На основе таблицы он идентифицирует адрес В с портом №2, куда и посылает пакет. Основные достоинства такого виртуального соединения:



- дуплексный режим работы (full duplex);
- создается только на время передачи пакета;
- все другие порты коммутатора пакет не получают, что исключает коллизии;

- возможно одновременное попарное соединение различных портов коммутатора, что увеличивает пропускную способность узла.

Поскольку коммутатор анализирует управляющую информацию пакета, то он должен содержать буферные устройства памяти для каждого порта, чтобы записать весь пакет или его часть. В связи с этим различают следующие режимы коммутации:

- коммутация “напролет” (Cut Through). Здесь считывается только адрес назначения и сразу начинается передача на выходной порт. Такие коммутаторы обладают высоким быстродействием (задержка 150 битовых интервалов) и простотой реализации, но допускают передачу ошибочных пакетов;

- коммутация с полной буферизацией (Store and Forward). Здесь записываются даже самые длинные пакеты целиком. В таком режиме нет перегрузок за счет большого объема памяти, но вследствие этого же задержка достигает 12000 битовых интервалов.

Если сравнивать цифровые коммутаторы каналов с коммутаторами Ethernet, то основные отличия у них заключаются в следующем:

- коммутаторы каналов имеют небольшие ячейки памяти (8 бит), в то время как объем памяти в коммутаторах Ethernet достигает 1500 байт;

- соединение в коммутаторах каналов происходит на основании сигналов управления и взаимодействия (СУВ), передаваемых либо отдельно (ОКС №7), либо в самом цифровом потоке (КИ 16 в ИКМ - 30). Соединение в Ethernet происходит в соответствии с таблицами коммутатора и MAC – адресами;

- число входных портов в КК достигает десятков тысяч, в то время как для КП это десятки единиц (16 – 32 – 64). Поэтому сети с коммутируемым Ethernet – это локальные сети предприятий с числом станций от десятков до 4 - 8 тысяч.

Основные недостатки сетей на коммутаторах Ethernet:

1. Сетевые карты станций даже в пределах одного подразделения имеют, как правило, случайные MAC – адреса, поскольку приобретались в разное время, а может быть и у разных производителей. Выстроить какую-либо иерархическую структуру адресации практически невозможно. Поэтому для больших сетей таблицы коммутации становятся очень громоздкими.

2. Если сеть, построенная на коммутаторах Ethernet, имеет “петли” (рисунок 6.25), то информация может циклически циркулировать по ним, создавая перегрузку.

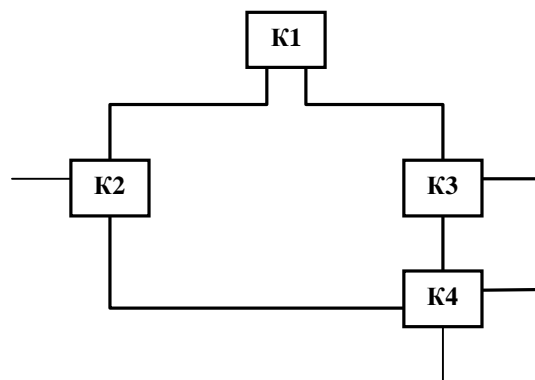


Рисунок 6.25 - Сеть на коммутаторах с петлями

3. Коммутаторы передают широковещательные пакеты по всем направлениям, что также создает перегрузку сети и так называемые “широковещательные штормы”.

#### 6.5.4 IP сети

Для объединения ЛВС сетей предприятий и территорий в глобальные сети было предложено несколько технологий. Большинство из них, в той или иной степени, опираются на применении понятий третьего (сетевого) уровня ЭМ ВОС – понятий маршрутизации. В основе принципа маршрутизации лежит собственная система адресации, существенно отличающаяся от адресации канального уровня (MAC – адреса и др.). Рассмотрим эту систему на примере IP - адресации. IP адреса выдаются не устройствам (сетевым картам), а пользователям (компьютерам, серверам, маршрутизаторам и т.п.) единым международным органом IANA, причем они выдаются целыми блоками крупным потребителям (организациям, операторам связи – провайдерам и т.п.). Эти потребители, в свою очередь, раздают адреса более мелким пользователям, которые включены в их сеть или взаимодействуют с ними виртуально. Таким образом, выстраивается определенная иерархия адресов “от старшего к младшему”, с помощью которой проще управлять процессом распределения информации на узлах. IP адрес состоит из 4 байт, например, 190.248.15.97. Часть этого адреса, один или два первых байта, обозначает адрес узла, а остальное - адрес сети или отдельной станции, присоединенный к этому узлу. Такая структура позволяет существенно сократить объем маршрутной информации, записываемой в маршрутизаторах.

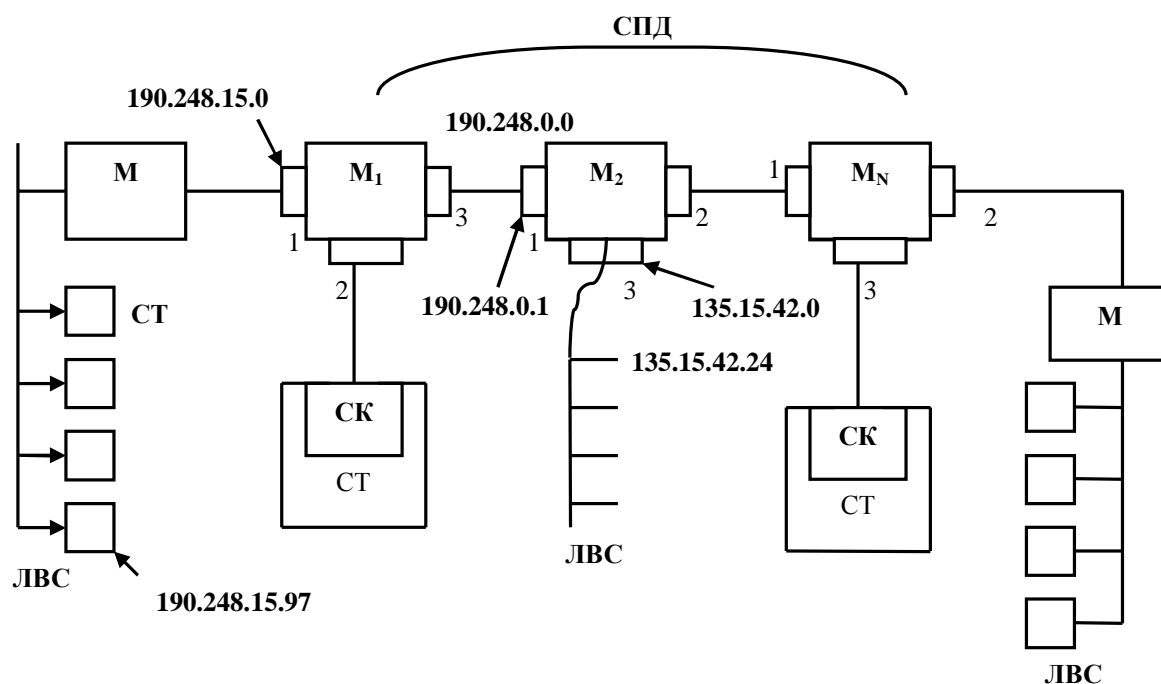


Рисунок 6. 26 -Сеть передачи данных на маршрутизаторах

В маршрутизаторах, также как и коммутаторах есть таблицы, содержащие основные поля: номер сети, адрес следующего маршрутизатора, номер или адрес порта и расстояние (количество промежуточных маршрутизаторов или “хопов”) от сети до маршрутизатора. Пример фрагмента таблицы для маршрутизатора М1 (рисунок 6.27) приведен ниже.

Номер сети	Адрес следующего маршрутизатора	Порт	Расстояние
190.248.15.97	190.248.15.0	1	1
135.15.42.24	135.15.42.0	3	2
140.248.0.1	198.248.0.0	3	1

Рисунок 6. 27- Фрагмент таблицы для маршрутизатора М1

Здесь первая строка описывает сеть непосредственно подключенную к М1, а вторая сеть 135.15.42.24 “видна” в М1 через маршрутизатор М2. Предположим что из сети передачи данных идут пакеты к М1. В адресном поле пакета есть адрес получателя, например 190.248.15.97. В то же время в таблицах всех маршрутизаторов, приближенных к М1 нет необходимости писать этот полный адрес, как и все другие адреса входящие в класс 190.248.0.0. Достаточно сделать одну запись 190.248.0.0 в таблицах этих маршрутизаторов и все пакеты будут направляться к порту 3 М1.

Составление таблиц маршрутизации производится либо вручную администратором сети (для небольших сетей), либо автоматически с помощью специальных протоколов RIP или OSPF.

К достоинствам маршрутизации пакетов следует также отнести:

- устранение “петель”, характерных для коммутаторов, поскольку маршрутизаторы имеют иерархическую структуру адресов и выбирают наикратчайший путь;
- защищенность от широковещательных штормов;
- возможность объединять сети различных протоколов канального уровня, например Ethernet и Frame Relay, на основе метода инкапсуляции. Суть этого метода состоит в следующем (рисунок 6.28).

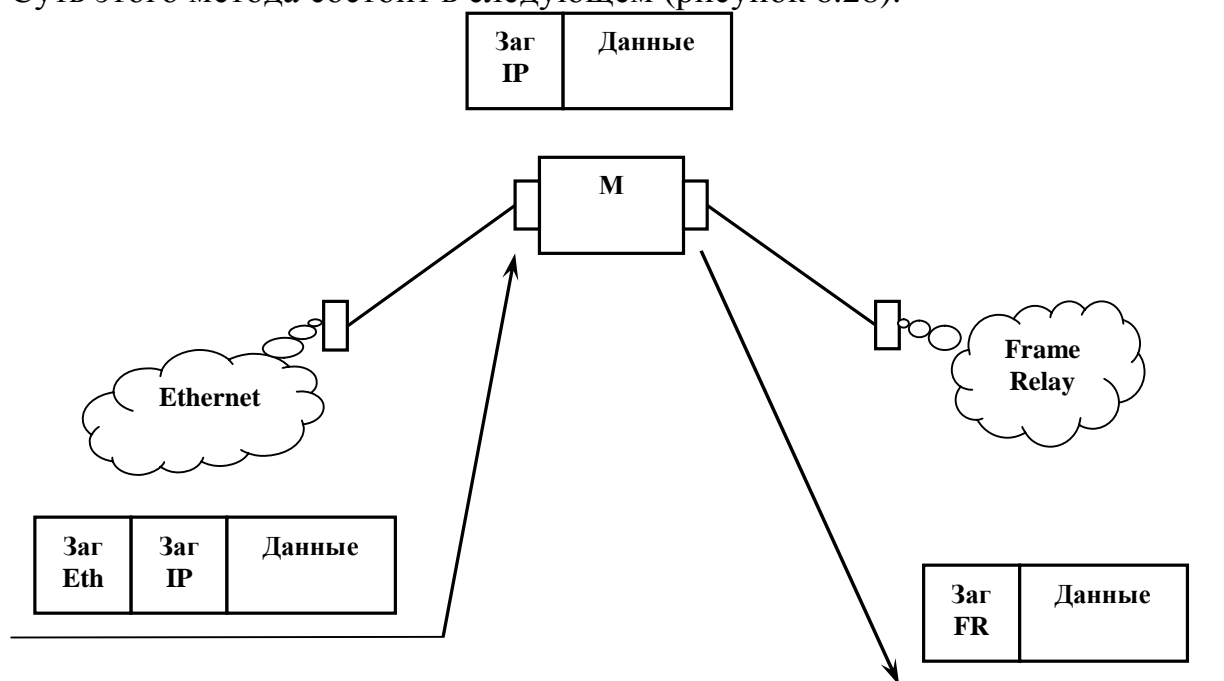


Рисунок 6. 28 - Объединение разнородных сетей

Пакет, приходящий из сети Ethernet содержит заголовок канального уровня, заголовок сетевого уровня (IP) и данные.

В маршрутизаторе заголовок Ethernet удаляется, из заголовка IP извлекается информация о протоколе принимающей сети и адреса. На основании этой информации формируется пакет по протоколу Frame Relay с соответствующим заголовком.

### 6.5.5 Виртуальные соединения

Ещё одной технологией обмена и распределения информацией является установление виртуальных соединений (VC). Эта технология позволяет объединить несколько локальных сетей, достаточно удалённых друг от друга, в единую сеть территории или корпорации. Суть этой технологии заключается в следующем. Между абонентами виртуальной сети вначале устанавливаются соединения с помощью протоколов маршрутизации, рассмотренных ранее. Для этого используются специальные пакеты. В процессе соединения каждому пути присваивается свой номер, который прописывается в специальных таблицах коммутации портов. Далее информационные пакеты с соответствующими номерами виртуального соединения

проходят именно по этому ранее установленному пути. При этом таблицы маршрутизации больше не используются.

Виртуальное соединение может быть либо постоянным (PVC), устанавливаемым вручную администраторами, либо коммутируемым (SVC), когда соединение происходит автоматически.

Основным достоинством технологии виртуальных соединений является более высокая потенциальная пропускная способность каналов. Дело в том, что при прохождении пакетов узлы анализируют только номер виртуального соединения (10-12 бит), в то время как при маршрутизации адреса конечных узлов могут содержать от 4 до 20 байт. При этом размеры таблиц и время анализа существенно больше.

Другим достоинством виртуального соединения является более высокая стабильность скорости передачи пакетов, чем при дейтаграммном методе, когда пакеты могут идти различными путями. В связи с этим метод виртуального соединения наиболее эффективен при передачи больших объёмов информации, в то время как дейтаграммный способ передачи целесообразен для передачи кратковременных потоков.

Этот метод похож на метод коммутации каналов или способ установления постоянного соединения абонентов с помощью выделенных линий. Существенная разница заключается в том, что в одних и тех же физических каналах может существовать несколько виртуальных соединений за счёт статистического уплотнения. Это обстоятельство позволяет значительно сократить расходы абонентов на организацию и эксплуатацию сети.

Метод виртуального соединения нашёл применение в различных телекоммуникационных технологиях X.25, Frame Relay, ATM, MPLS, Tag – switching в Ethernet и др. В качестве иллюстрации рассмотрим некоторые из них.

**Cemu Frame Relay.** Эти сети используют, как правило, постоянные виртуальные соединения (PVC) и поэтому работают только на канальном и физическом уровнях. Каждому PVC присваивается номер называемый Data Link Connection Identifies - DLCI. Все DLCI прописываются в таблицах коммутации портов. При поступлении кадра (рисунок 6.29) узел анализирует идентификатор DLCI и отправляет кадр по нужному маршруту. В адресном поле кадра FR есть и

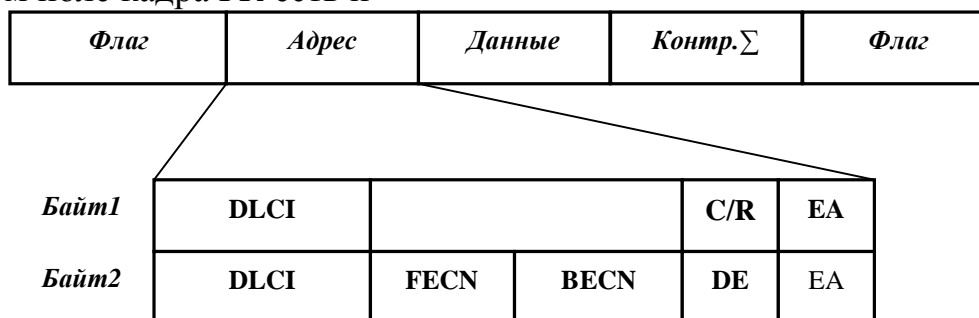


Рисунок 6. 29 - Формат кадра Frame Relay

другие позиции, из которых биты FECN и BECN используются для оповещения о перегрузке вперёд и назад соответственно, бит DE содержит команду о сбросе данного кадра, если его значения есть 1. Таким образом, технология Frame Relay обеспечивает некоторый уровень качества обслуживания QoS, не допуская перегрузок в каждом виртуальном соединении.

**Сети ATM.** Технология асинхронного режима передачи – новая универсальная технология, разработанная для передачи мультимедийного трафика (голос, данные, видео), с представлением различных категорий качества (скорость, задержка, искажение информации) каждому виду трафика. Она сочетает в себе определенные свойства методов коммутации каналов и коммутации пакетов. Здесь, как и в сетях передачи данных, используются пакеты, называемые ячейками, со своими адресами, но размер этих пакетов небольшой и все они одинаковой длины (53 байта). Малый размер ячейки обеспечивает небольшую задержку при передаче, что крайне необходимо для голосового трафика.

С точки зрения построения сети ATM использует типичную технологию виртуальных каналов, использующую высокоскоростные коммутаторы. Коммутация ячеек происходит на основе идентификатора виртуального канала VCI, который присваивается при установлении соединения и удаляется при разрыве соединения. Адрес конечного узла ATM в отличие от номера VCI содержит 20 байт и имеет иерархическую структуру, включающую коды стран, городов, операторов связи и др., что облегчает процедуру установления соединения.

Установление виртуального соединения здесь может быть не только постоянным (PVC), но в большинстве случаев – коммутируемым (SVC). Во втором случае на основе 20 байтных адресов строятся таблицы маршрутизации в соответствии со специальным протоколом PNNI – Private Network to Network Interface. По этим таблицам с помощью специальных пакетов прокладывается виртуальное соединение, которое и нумеруется. Для облегчения этой нумерации помимо номера канала VCI вводится понятие виртуального пути со своим идентификатором VPI. Путь объединяет несколько каналов, идущих какую-то значительную часть трассы вместе (рисунк 6.30).



Рисунок 6. 30 - Объединение каналов

Поэтому в адресе ячейки ATM есть поле VPI (8 бит) – старшая часть адреса и поле VCI (16 бит) – младшая часть адреса. В процессе продвиже-

ния ячейки эти идентификаторы меняются в соответствии с таблицами коммутаторов АТМ, но начальные и конечные идентификаторы остаются неизменными.

## 7 СЕТИ ДОСТУПА

### 7.1 Понятие сетей доступа

В последнее время наряду с делением сетей связи на первичные, вторичные и т. д. (раздел 1.2) чаще применяют другую классификацию, разделяя телекоммуникационные сети на транспортные или магистральные и сети доступа. Это связано с тем, что функции первичных и вторичных сетей начинают объединяться, поскольку цифровые сигналы, что от телефонии, что от терминалов передачи данных имеют одинаковую структуру и между сетевыми узлами передаются цифровые потоки с мультисервисным содержанием. Поэтому под транспортной сетью понимают часть сети связи, включающую магистральные узлы, междугородные станции, а также те порты городских и районных станций, которые связаны с междугородными станциями. К транспортной сети относятся также каналы, соединяющие все выше названные станции.

Сеть доступа – это совокупность абонентских и соединительных линий, узлов концентрации нагрузки и станций местной сети, обеспечивающих выход абонентов через свои терминалы в транспортную сеть или местную связь без использования транспортной сети. Поскольку сеть доступа является мультисервисной (телефон, данные, видео), то в ее составе необходимы узлы распределения по различным услугам. Обобщенная структурная схема сети доступа приведена на рисунке 7.1.

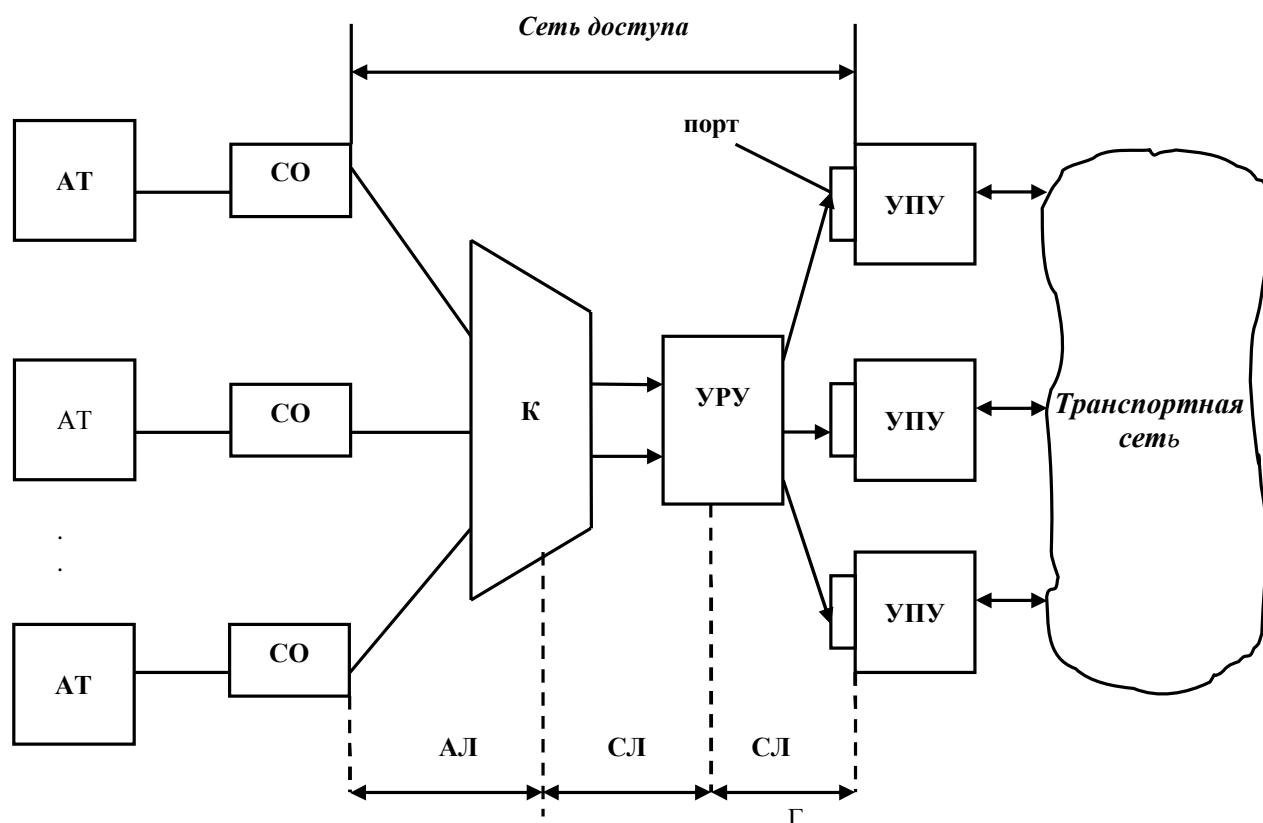


Рисунок 7.1 - Структурная схема сети доступа



Здесь абонентские терминалы (АТ) – телефоны, модемы и т.п. – через сетевые окончания (СО) (розетки, разъемы) подключаются к сети доступа. От сетевых окончаний к концентраторам (К) или сразу к узлу распределения услуг (УРУ) идут абонентские линии (АЛ). Концентраторы, УРУ и узлы представления услуг (УПУ) связаны более скоростными соединительными линиями. Концентраторы нагрузки служат для уплотнения сигналов, идущих по абонентским линиям. Если сеть мультисервисная, то необходимы УРУ. Если услуга одна, то такой узел не нужен. В этом случае узел представления услуг будет один. Входные порты УПУ можно отнести к сети доступа, а выходные порты уже подключены к транспортной сети. В последующих разделах мы подробнее рассмотрим различные варианты сетей доступа.

## 7.2 Доступ к телефонным сетям

Телефонная сеть общего пользования представляет из себя набор сетевых узлов и сетевых станций, связанных между собой системами передачи (см. рис. 1.10). К сетевым станциям (АТС) подключаются сети доступа. В настоящее время доступ абонентов к телефонным сетям осуществляется преимущественно по медным многопарным электрическим кабелям (рисунок 7.2)

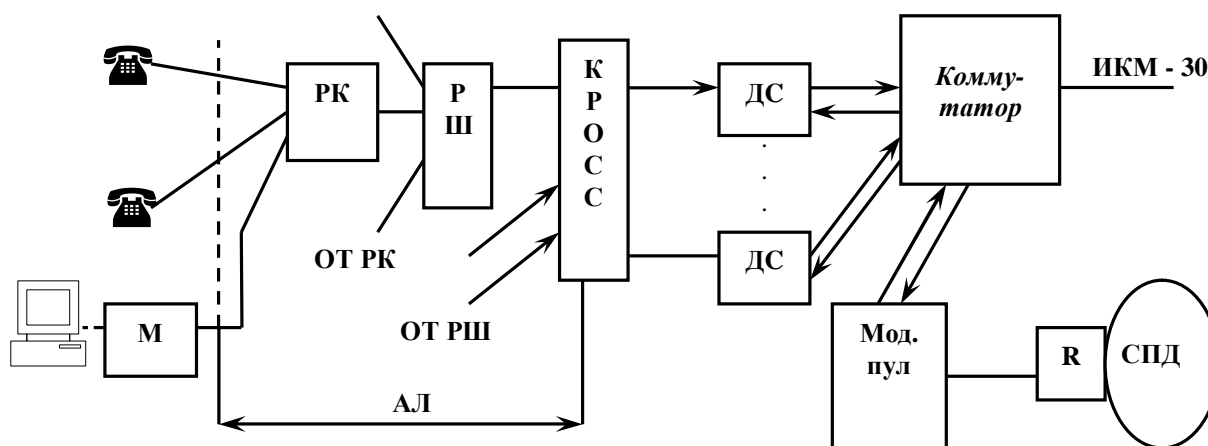


Рисунок 7.2 - Сеть доступа на основе аналоговых абонентских линий

Здесь абонентские терминалы, аналоговые телефонные аппараты (формируют речевые сигналы в диапазоне 0.3 – 3.4 кГц) через телефонные розетки типа RJ-45 (сетевое окончание) подключаются к распределительным коробкам (РК) с помощью однопарных электрических кабелей типа ТРП. К выходу коробки подключен уже многопарный кабель (обычно 10 пар). Кабели с РК поступают на распределительные шкафы (РШ), а затем на кросс, который располагается на АТС. Одна пара проводов проходящая от абонента последовательно через РК, РШ и кросс составляет абонентскую линию (АЛ). Далее с помощью дифференциальной системы (ДС)

двухпроводное окончание преобразуется в четырехпроводное, с помощью которого абонентская линия подключается к порту коммутатора. В данном примере коммутатор является узлом предоставления услуг, поскольку вместе с системой сигнализации организует услугу телефонной связи. Ни концентратора, ни УРУ здесь пока нет, так как услуга одна.

Если через такую ТФОП с помощью модема М, модемного пула и маршрутизатора R организуется передача данных, то коммутатор уже начинает выполнять и роль УРУ, так как по серийному номеру модемного пула отделяет сигналы сети передачи данных (СПД) от телефонных. Для СПД узлом предоставления услуг будет маршрутизатор.

В последнее время в телефонных сетях доступа применяются мини – АТС или PBX (Private Branch Exchange). Их назначение – коммутация трафика абонентов внутри одного учреждения и передача внешнего трафика в ТФОП (рисунок 7.3). Здесь число входящих линий (от абонентов) больше чем число выходящих (к АТС).

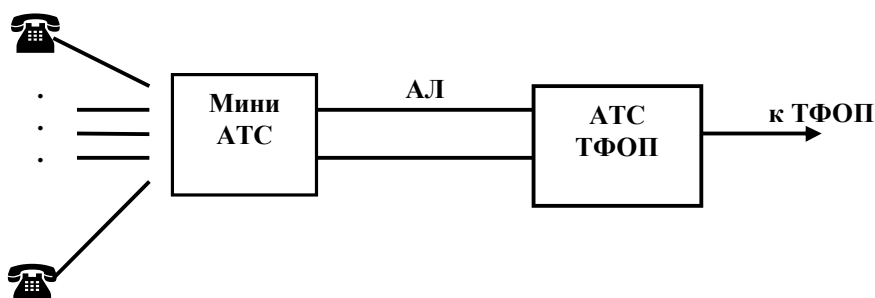


Рисунок 7.3- Включение мини – АТС в сеть доступа на аналоговых линиях

Поэтому абонентские линии, идущие к АТС могут испытывать блокировку, но нагрузка в каждой линии (трафик) будет большой. Можно сказать, что мини – АТС выполняют также функции концентратора.

Мини – АТС наряду с аналоговыми входами и выходами могут иметь и цифровые. Эти случаи будут рассмотрены ниже.

### 7.3 Цифровые сети доступа

Развитие транспортных цифровых сетей заставляет искать решения по цифровым сетям доступа с целью повышения качества и удобства телекоммуникационных услуг. Для этого цифровой сигнал нужно как можно больше приблизить к абоненту. В этом случае все или большинство компонент сети доступа должны функционировать с цифровыми сигналами. Рассмотрим возможные варианты.

#### 7.3.1. Абонентские линии

**Коммутируемые** - на основе канала тональной частоты работают в полосе частот 0.3 – 3.4 кГц. Модемы с многоуровневой модуляцией, где

число уровней квантования достигает 128, обеспечивают скорости передачи не выше 34кБ/с ( протокол V.34 ) в двустороннем режиме и до 56кБ/с ( протокол K56Flex ) при симметричном режиме передачи. Основная особенность такого ( аналогового ) режима передачи является ограничение полосы пропускания, и тот факт, что устройство АЦП и ЦАП находится на стороне АТС. ( рисунок 7.4 ).

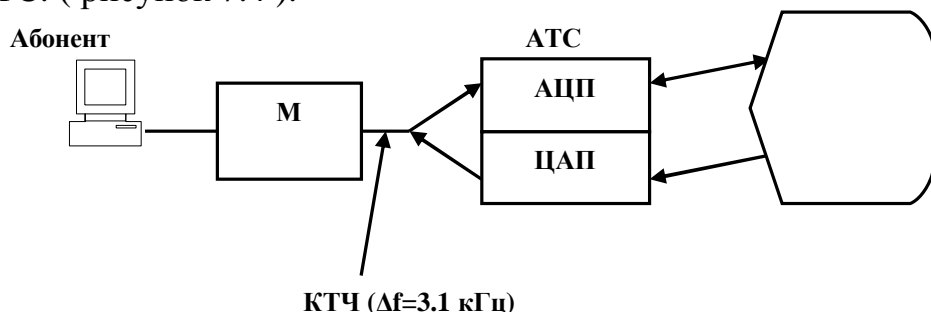


Рисунок 7.4 - Модемное (dial up) соединение

### 7.3.2. Цифровые коммутируемые линии.

В этих линиях цифровой сигнал формируется в терминальном оборудовании абонента (компьютер, цифровой телефон ), а затем передается по линии связи но уже не в полосе 3.1кГц, а в той, которую позволяет среда передачи. Наиболее распространенной является все та же пара или две пары медных проводов (рисунок 7.5).

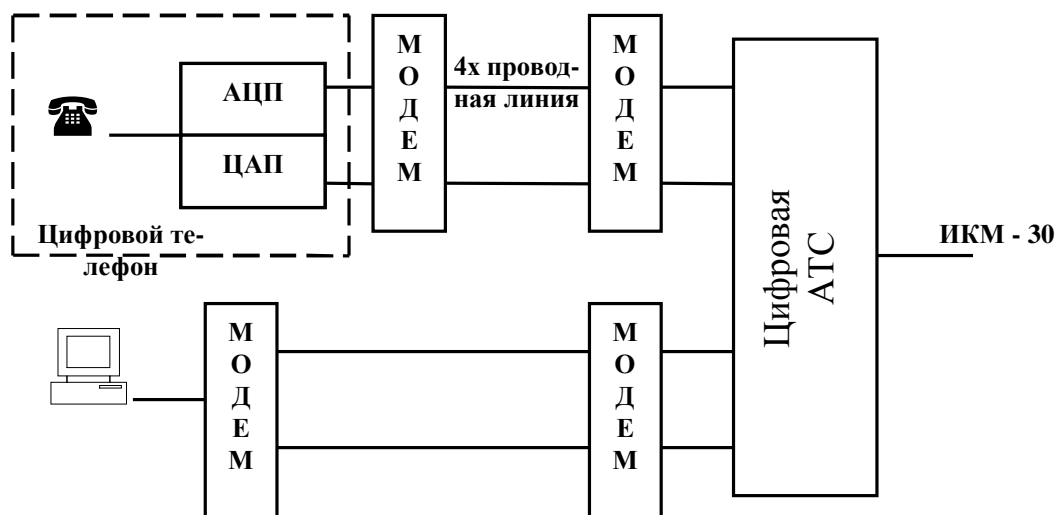


Рисунок 7.5 - Цифровая линия доступа

Частотная характеристика затухания и волнового сопротивления двухпроводной линии на один километр длины приведена на рисунке 7.6.

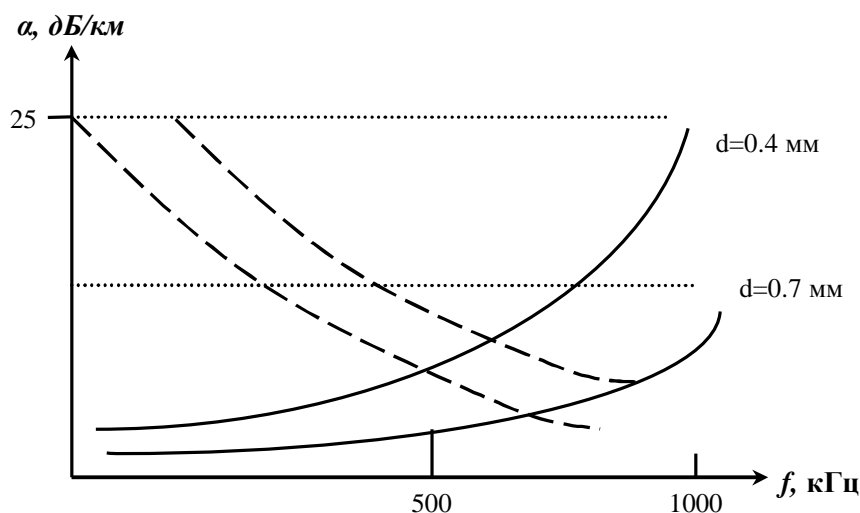


Рисунок 7.6 - Частотная характеристика затухания в двухпроводной линии

Из него видно, что затухание увеличивается с ростом частоты но эффективная полоса пропускания может быть значительно больше чем у КТЧ ( 3.1кГц ). Так, если допустить максимальную неравномерность затухания 75 – 80дБ, то при полосе пропускания  $\Delta f=500$  кГц можно получить дальность действия линии в 3-5км. Скорость передачи при этом можно увеличить за счет многоуровневого кодирования. Так, в соответствии с теоремой Шеннона пропускная способность канала связи в битах в секунду

$$B = \Delta f \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right),$$

где  $\frac{S}{N}$  - отношение сигнал – шум в децибелах.

При  $\Delta f = 500$  кГц и шестнадцати уровнеом кодировании  $B=2$ Мбит/с.

Для реализации таких теоретических оценок разработано много разновидностей модемов для цифровых абонентских линий ( ЦАЛ ). Самым простым вариантом является использование линейного кодирования 2B1Q. Суть этого кода иллюстрируется рисунком 7.7, где изображены осциллограмма (а) и векторная диаграмма (б) цифрового сигнала. Здесь каждому временному интервалу соответствует одно из четырех состояний (4 – х уровневое кодирование).

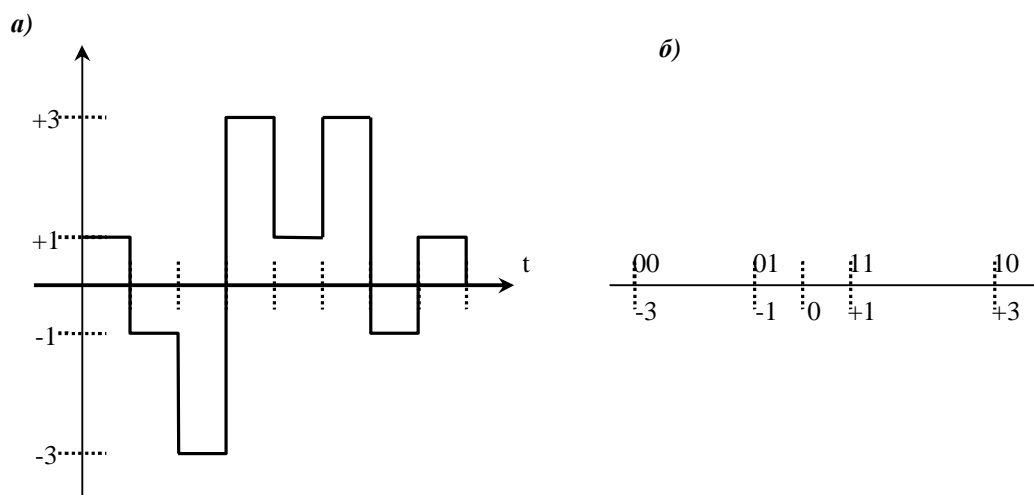


Рисунок 7.7 - Диаграммы сигнала 2B1Q

Спектр сигнала 2B1Q изображен на рисунке 7.8. Из этого рисунка следует еще одно важное свойство таких модемов.

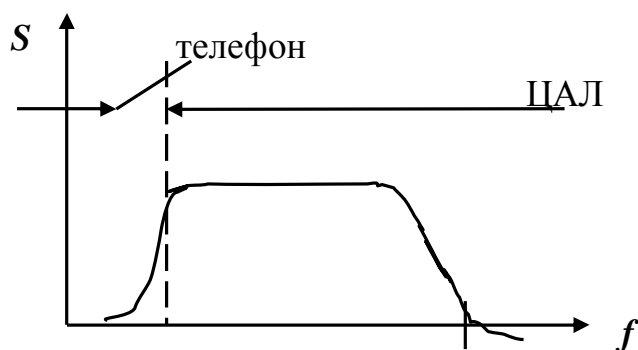


Рисунок 7.8 - Спектр сигнала 2B1Q

Поскольку сигнал биполярный, то его спектральные составляющие на низких частотах равны нулю. Следовательно, наряду с широкополосным сигналом в такой линии можно одновременно передавать сигналы КТЧ (телефонию).

Разумеется, что в модемах реализуется компенсация неравномерности частотной характеристики линии, эхокомпенсация и другие технические приемы для повышения качества и скорости передачи.

Вернемся теперь к коммутируемым цифровым абонентским линиям. В настоящее время на основании рекомендаций ITU-T разработан стандарт ISDN (Integrated Services Digital Network) – цифровых сетей с интегральным обслуживанием. Этот стандарт предусматривает цифровой базовый доступ BRI по трем каналам 2B+D, где B – канал со скоростью 64Кбит/с, а D – цифровой канал со скоростью 16Кбит/с. Упрощенная схема доступа с интерфейсами приведена на рисунке 7.9.

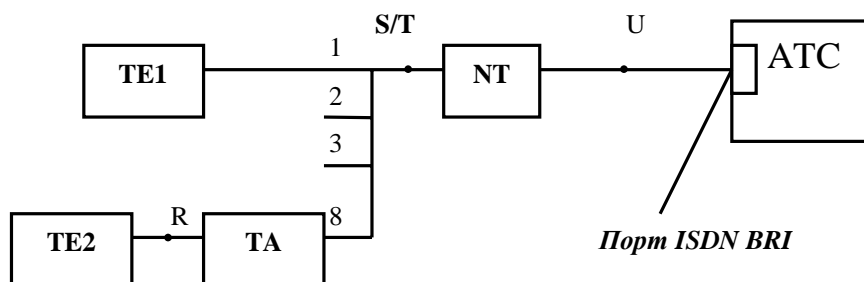


Рисунок 7.9 - Схема доступа ISDN BRI

Здесь TE1 – терминальное оборудование, непосредственно работающее в стандарте ISDN, например цифровой телефон или мини АТС с цифровым выходом.

Точка подключения этих терминальных устройств S или T содержит стандартный разъем RJ45 для подсоединения двух линий передачи и питания. Через интерфейс в точке S происходит непрерывная передача битов в обоих направлениях. В точке S могут быть подключены до 8 терминальных устройств, однако одновременно передавать информацию могут только 2.

В системе ISDN BRI могут работать не только терминальные устройства стандарта ISDN, но и другие, например, наиболее распространенные аналоговые телефонные аппараты, или компьютеры. Они на схеме обозначены как TE2. Для их согласования с интерфейсом S применяется терминальный адаптер ТА. Поскольку такие устройства различны, то интерфейс R также будет разным. Так для согласования, аналогового телефона, работающего по двухпроводной линии в составе ТА необходима дифсистема.

Интерфейс U определяет процедуру передачи сигналов между оборудованием абонента и АТС. Этот интерфейс не стандартизован, поэтому допускаются различные его варианты. Наиболее распространен базовый доступ по двухпроводной линии с общей скоростью 160 Кбит/с (2B+D+ служебная информация синхронизации и управления). Для сжатия полосы частот используется код 2B1Q (скорость передачи 80 Кбод), и для обеспечения двунаправленной передачи метод эхокомпенсации. Суть этого метода заключается в том, что приемник и передатчик работают одновременно. Поскольку уровень сигнала передатчика и время действия импульса известны, то он вычитается из суммарного сигнала (передаваемый плюс принимаемый).

Упрощенная схема эхокомпенсатора приведена на рисунке 7.10.

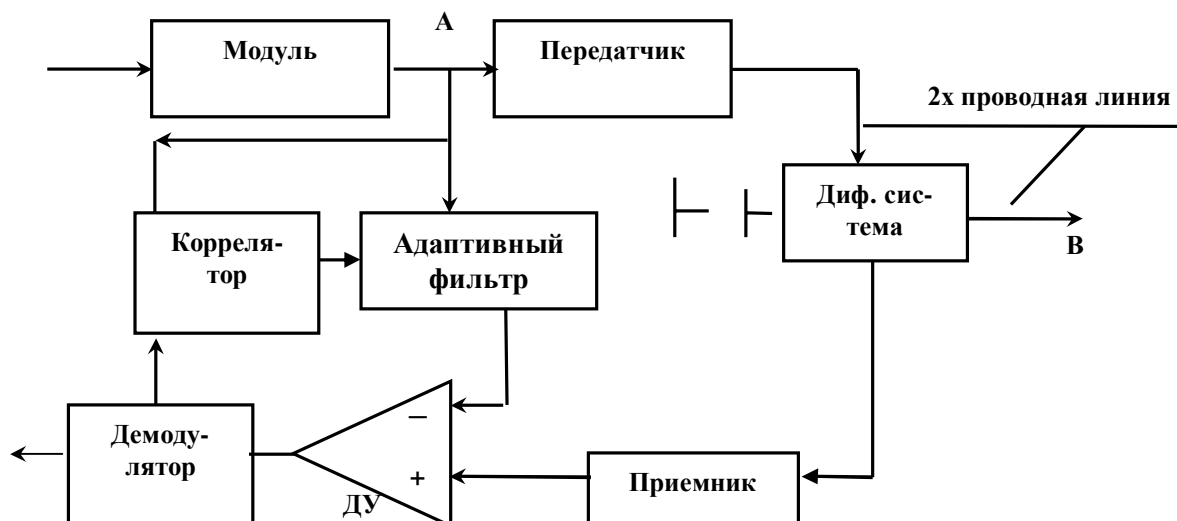


Рисунок 7.10 - Эхокомпенсатор для модема двухпроводной линии

Здесь часть передаваемого сигнала (А) ответвляется и подается на дифференциальный усилитель ДУ, где вычитается из принимаемого сигнала. Принимаемый сигнал состоит из полезного сигнала, передаваемого “противоположной” стороной (В), и эхосигналов. Эхосигналы возникают при отражениях сигнала А от неоднородностей линии и стыка линии и модема В, за счет сложной зависимости волнового сопротивления от частоты (рис. 7.6 ). Вот эти сигналы и надо компенсировать. Чтобы их отличить от истинных сигналов В применяют корреляционную обработку. Для этого параметры сигналов А и В должны быть различны. Например, разные скорости передачи и линейные коды.. В корреляторе выделяются только эхосигналы и он дает информацию адаптивному фильтру о присутствии и уровне эхосигнала

Для перехода от точки S (или Т) к точке U применяется сетевое окончание (модем) NT.

Цифровой способ формирования и передачи в ISDN-BRI позволяет реализовать гибкую систему подключения абонентских терминалов. Так возможны следующие режимы работы:

- одновременно работают два телефона
- одновременно работает телефон и модем на скорости 64кБ/с.
- модем работает на скорости 144кБ/с.

### 7.3.3 Цифровые линии xDSL

Как уже говорилось в предыдущем разделе по обычной медной линии можно передавать сигналы с шириной спектра до 1 МГц. Применение многоуровневого или других видов кодирования позволяет получить скорости передачи данных до 50Мбит/с. Цифровые линии, использующие такие тех-

нологии – цифровые абонентские линии или, как сейчас чаще говорят, DSL – Digital Subscriber Line. Поскольку режим работы линии определяет модем, а разновидностей модемов DSL много, в литературе применяют такую аббревиатуру xDSL, где x и отражает индивидуальность модема и технологии. В таблице 7.1 приведены типы модемов xDSL и их основные характеристики [2].

Таблица 7.1 Характеристики модемов xDSL					
тип	Название	Скорость, Мбит/с	Способ передачи	Число пар	Дальность, км
DSL	Digital subscriber line ( <i>Цифровая абонентская линия</i> )	0.160	Дуплекс	1	8
HDSL	High – data rate DSL ( <i>Высокоскоростная ЦАЛ</i> )	1.5 2.0	Дуплекс Дуплекс	2 2 - 3	3.5
ADSL	Asymmetric DSL ( <i>Ассиметричная ЦАЛ</i> )	1.5 – 8 0.016 - 1	К абоненту От абонента	1	2.5 – 5.5
RADSL	Rate adaptive DSL ( <i>Адаптивная по скорости ADSL</i> )	<b>Переменная</b> До8 До1	К абоненту От абонента	1	2.5 – 5.5
VDSL	Very high data rate DSL ( <i>Высокоскоростная ЦАЛ</i> )	13 – 52 1.5 – 2.3	К абоненту От абонента	1	0.3 -1.5

Как следует из таблицы, в зависимости от скорости передачи меняется и дальность действия модемов. Другой отличительной особенностью является необходимость использования двухпроводной или четырехпроводной линии для организации двусторонней передачи данных. Наконец, системы xDSL допускают передачу с одинаковой скоростью в обоих направлениях или асимметричный режим, когда скорость передачи информации к пользователю больше, чем от него.

Рассмотрим эти особенности подробнее.

1. Поскольку полоса пропускания линии ограничена частотой ~0.5 МГц, то получить высокую скорость передачи можно только за счет совершенствования модемов. К настоящему времени известны три основные технологии, применяемые при разработке модемов.



**Кодирование 2B1Q.** Этот метод используется в ISDN – BRI и описан выше. Кроме того, он применяется в первых системах HDSL и MDSL. Разумеется, что эта технология более предпочтительна, чем ИКМ - 30, так как позволяет передавать информацию со скоростью 2 Мб/с в полосе частот 500 Гц. Тем не менее затухание сигнала на высоких частотах и неравномерность волнового сопротивления очень велики, и это приводит к ухудшению качества передачи сигналов. К другим недостаткам кодов 2B1Q как следствие наличия высоких частот в спектре являются:

- большой уровень перекрестных помех в соседних парах многопарного электрического кабеля,
- неравномерность АЧХ, ослабление высокочастотных спектральных составляющих, что уменьшает дальность действия модемов,
- искажение формы импульса и групповая задержка сигнала вследствие дисперсии фазовой скорости.

Таким образом, необходимы другие методы модуляции и кодирования, позволяющие уменьшить ширину спектра сигнала.

**Технология CAP(Carrierless Amplitude and Phase Modulation).** Эта технология позволяет существенно уменьшить влияние перечисленных недостатков технологии 2B1Q. Уменьшение ширины спектра сигнала здесь происходит за счет применения многоуровневой амплитудно – фазовой модуляции в сочетании с выделением одной (верхней) полосы частот модулированного сигнала (см. раздел 3.1). Несущая частота сигнала модулируется по амплитуде и фазе, причем число значений вектора сигнала составляет 64 и 128(рисунок 7.11).

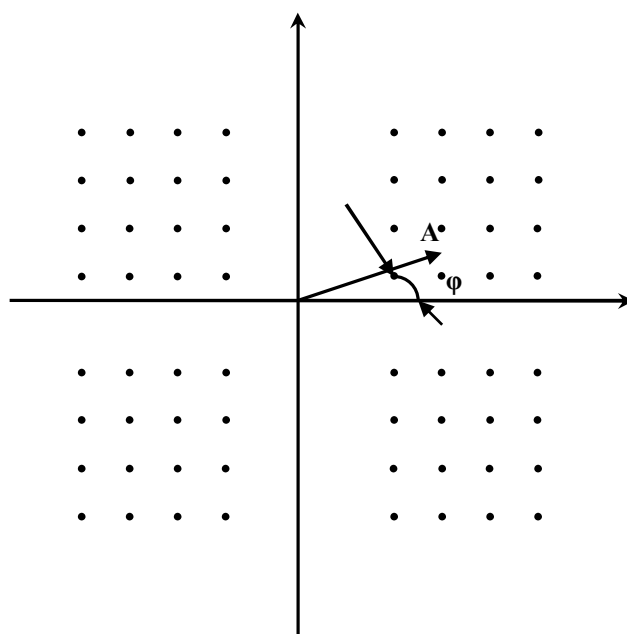


Рисунок 7.11 - Диаграмма состояний CAP – 64 сигнала:  $\varphi$  – фаза,  $A$  – амплитуда

Количество бит, передаваемых за одну посылку (бод) равняется

$$I = \lg l ,$$

где  $l$  – число разрешенных состояний. При  $l=64$ ,  $I=6$ , а при  $l=128$ ,  $I=7$ . Таким образом, при CAP – 64 за каждую посылку передается 6 бит информации, в то время как при 2B1Q их передается 2. Увеличение информационной скорости позволяет сократить тактовую частоту и существенно снизить полосу пропускания. На рисунке 7.12 приведены спектры сигналов 2B1Q и CAP – 64 при одинаковой скорости передачи 1168 Кбит/с .

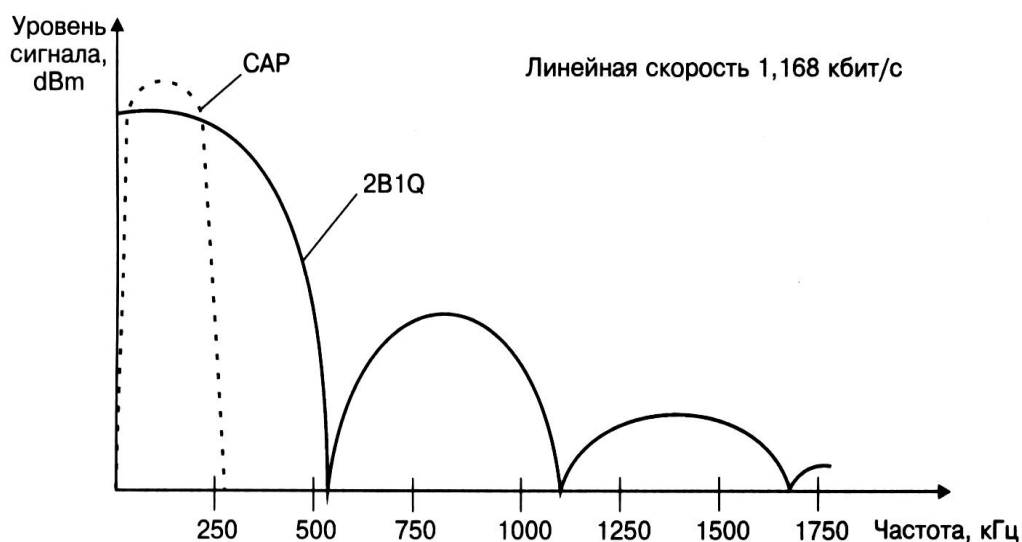


Рисунок 7.12 - Сравнение спектров сигналов 2B1Q и CAP – 64(6.7 Парфенов)

**Кодирование TC – PAM (Trellis Coded Pulse Amplitude Modulation).** Здесь число уровней амплитудной модуляции по сравнению с 2B1Q увеличено до 16 и применен метод решетчатого кодирования по алгоритму Витерби для повышения качества передачи (предсказание ошибок). Суть метода заключается в нахождении свертки последовательности входных битов с такой же последовательностью, но переданной на несколько тактов раньше. Сформированная так кодовая комбинация на приемном конце сравнивается с набором проверочных комбинаций и при этом выбирается наиболее близкая к принимаемой. В условиях сильных наводок и помех надежность передачи существенно возрастает. Это свойство кодов TC – PAM оказалось более значимым при построении модемов, чем незначительное расширение спектра по сравнению с CAP – 64 или CAP – 128. По сравнению с технологией 2B1Q коды TC – PAM выигрывают и по ширине спектра (в 1.5 – 2 раза) и существенно в помехоустойчивости.

2. Режим двусторонней передачи в xDSL системах возможен как по двум парам проводов, так и по одной паре.

Наиболее простым способом является передача сигналов для каждого из двух направлений по своей паре (пространственное разделение каналов). Типичным представителем такой технологии является HDSL, где исполь-

зуется модуляция 2B1Q и по каждой паре передается цифровой поток со скоростью 2 Мбит/с.

Размещение пар может быть либо по однокабельной, либо по двухкабельной схеме. В первом случае провода обеих пар находятся в одном многопарном кабеле и здесь возможны наводки, как на ближний, так и на дальний конец. При двухкабельной схеме, когда провода разных направлений размещены в разных кабелях, эти наводки минимальны. Основным недостатком такого метода передачи является необходимость выделения двух пар проводов, что дорого для абонента и не всегда возможно.

В связи с этим большинство разрабатываемых технологий xDSL сейчас позволяют организовать двустороннюю передачу по одной паре. Проблема разделения направлений передачи и приема решается тремя способами: 1)использованием дифсистем и эхокомпенсации, 2)разделение по времени, 3)разделение по частоте. Первый способ был описан ранее. Разделение по времени чаще всего реализуется как переключение направлений передачи (полудуплекс или метод пинг – понг), когда передатчики и приемники абонента и станции включаются поочередно. При синхронной передаче скорость уменьшается в два раза по сравнению со случаем двух пар.

При разделении направлений по частоте требуется более чем двукратное расширение полосы, если учесть защитный частотный интервал между двумя частотными диапазонами. Кроме того этот метод требует применения аналоговых высокоизбирательных частотных фильтров, что дорого, громоздко и не технологично.

Поэтому в настоящее время для двусторонней передачи используют чаще всего дифсистемы или временной метод.

3. Симметричный режим передачи в системах xDSL реализуется как для двух, так и для одной пары.

К этим технологиям относятся ISDN – BRI, HDSL, SDSL. Пропускная способность этих систем постоянна (см. таблицу 7.1), что не всегда эффективно. Поэтому разработаны адаптивные технологии, когда скорость может регулироваться либо вручную, либо автоматически. При этом изменяется и дальность действия модемов.

Области применения симметричных модемов в сетях доступа следующие:

- замена ИКМ – трактов в соединительных линиях при увеличении длины участка регенерации до 25 км,
- подключение учреждений АТС,
- подключение корпоративных абонентов к сетям передачи данных регионального масштаба с целью построения своих сетей,
- скоростной доступ в Интернет организаций и частных пользователей,
- оказание мультисервисных услуг (телефон и Интернет, видеоприложения и Интернет).

Асимметричные технологии и прежде всего ADSL в первую очередь предназначены для скоростного доступа в Интернет, когда трафик из сети к абоненту гораздо больше, чем обратный, который содержит только запросы. Для того чтобы эта технология стала массовой необходимо было использовать существующие двухпроводные абонентские линии без всяких переделок и с сохранением существующей телефонной связи (аналоговой или цифровой). Таким образом, для технологий ADSL необходимо применение линейных кодов, в спектре которых отсутствуют низкочастотные спектральные составляющие (рис.7.8). При этом телефонный сигнал, спектр которого находится в области низких частот, не создает помех сигналу передачи данных. Разделение этих сигналов у абонента и на узле сети реализуется с помощью частотных разветвителей (фильтров), называемых также сплиттерами (рисунок 7.13).

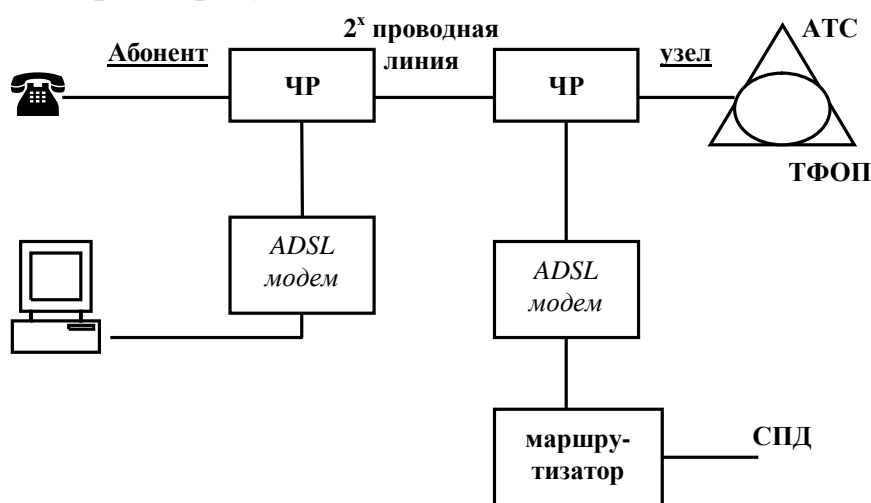


Рисунок 7.13 - Схема ADSL подключения

ADSL технология является альтернативой режиму dial up. Она наиболее эффективна на небольших расстояниях (до 3 км) при диаметре проводника электрической пары 0.4 – 0.5 мм. Обычно на узле модемы объединяются в стойку, называемую DSL Access Module (DSLAM). Как правило, DSLAM имеет порт Ethernet, к которому могут быть подключены коммутаторы, маршрутизаторы и другие сетевые устройства. На участке между DSL модемом и DSLAM передаются три потока:

- Речевой телефонный (КТЧ) в диапазоне 0.3 – 3.4 кГц
- Высокоскоростной цифровой поток к абоненту (downstream) со скоростями от 1.5 до 6 Мбит/с
- Низкоскоростной цифровой поток от абонента (upstream) со скоростями от 15 до 640 Кбит/с.

Каждый цифровой канал может быть разбит на несколько низкоскоростных каналов, в которых скорость кратна величинам 1.536 Мбит/с или 2.048 Мбит/с. Эта процедура позволяет регулировать скорость, которая зависит от параметров телефонной линии (длина, диаметр провода, наличие дефектов и неоднородностей).

Для разделения перечисленных выше цифровых потоков применяют следующие методы. Как уже говорилось, сигнал КТЧ отделяется от цифрового сигнала сети передачи данных с помощью частотного фильтра. Разделение входящего и исходящего цифровых потоков реализуется двумя способами: 1) с частотным разделением каналов, 2) методом эхокомпенсации. В первом случае исходящий цифровой поток передается в полосе частот до 140 кГц, а входящий в полосе 0.14 – 1.1 МГц. Для обеспечения высокой скорости передачи и ее регулирования применяется дискретная многотональная модуляция (DMT).

При эхокомпенсации применяют дифсистемы, встроенные в модемы (см. раздел 7.3.2.).

Для дальнейшего совершенствования описанной технологии были разработаны ее модификации ADSL2 и ADSL2+. ADSL2 разработана в основном для увеличения скорости передачи на больших расстояниях в линиях с низкой помехоустойчивостью. Для этого в модемах применили более эффективную многоуровневую модуляцию и помехоустойчивое кодирование, сократили долю служебной информации. При этом удалось достигнуть прироста скорости на 100 кбит/с с одновременным увеличением дальности на 200 м.

ADSL2+ напротив предназначена для работы на коротких линиях (<1500 м). Расширение полосы пропускания двухпарного электрического кабеля до 2.2 МГц позволяет реализовать скорость передачи до 20 Мбит/с.

### 7.3.4 Системы передачи (соединительные линии)

Как уже говорилось ранее, соединительные линии идут от узла доступа к опорному узлу телекоммуникационной сети (АТС ТФОП, узел СПД и т.п.).

Как правило по ним передаются цифровые потоки  $n \times E1$  (ИКМ – 30). Физической средой передачи могут быть:

- пары в многопарном электрическом кабеле в сочетании с xDSL модемами (см. п. 7.3.3),
- волоконно - оптические линии связи (ВОЛС),
- цифровые радиорелейные линии (ЦРРЛ).

При построении сетей доступа на основе ВОЛС необходимо на узле доступа со стороны соединительной линии обеспечить преобразование электрического сигнала в оптический и наоборот. Для этих целей применяют оптоволоконные модемы (оптические конвертеры). В качестве передатчиков используются полупроводниковые лазеры с длиной волны  $\lambda=0.85$  мкм, 1.31 мкм, 1.55 мкм, а приемниками служат быстродействующие pin-фотодиоды. Оптическое волокно может быть как одномодовое (SM), так и многомодовое (MM). Дальность действия таких соединительных линий: до 6 км (MM,  $\lambda=0.85$  мкм), до 100 км (SM,  $\lambda=1.55$  мкм). Интерфейсы доступа кроме G.703 – V.35, V.24, Ethernet. Скорости передачи до 34 Мбит/с.

Цифровые радиорелейные линии применяются в условиях малонаселенной и труднодоступной местности, в городских условиях, когда прокладка кабеля затруднена, а также в случаях, когда связь необходимо развернуть оперативно. Современные ЦРРЛ работают в частотных диапазонах от 400 МГц до 20 ГГц. Дальность действия определяется условиями прямой видимости (5-40 км). Скорость передачи – до 34 Мбит/с, интерфейсы доступа: G.703, V.35, Ethernet.

К недостаткам ЦРРЛ следует отнести: влияние осадков на качество передачи, необходимость высоких мачт для размещения антенн приемопередатчиков.

### 7.3.5 Узлы доступа.

Как уже говорилось в разделе 7.1. абонентские линии объединяются в узлах концентрации нагрузки, роль которых могут выполнять узлы распределения услуг (УРУ) и узлы предоставления услуг. Будем называть ту или иную совокупность этих устройств узлами доступа. Эти узлы бывают следующих типов:

- мультиплексоры
- выносные концентраторы
- учрежденческие или мини АТС
- коммутаторы сетей передачи данных
- маршрутизаторы доступа.

Рассмотрим здесь мультиплексоры и выносные концентраторы:

*Абонентские мультиплексоры* предназначены для объединения цифровых сигналов, поступающих от абонентов и последующей передаче в одном скоростном цифровом потоке (рисунок 7.14). Здесь происходит стандартное уплотнение во времени цифровых сигналов. Основное преимущество этой технологии – экономия количества пар в многопарном кабеле, а недостатки – неэффективное использование скоростного выходного канала и отсутствие внутренней коммутации. Сигналы абонентов, принадлежащих одному мультиплексору при их разговоре, будут передаваться на АТС, и затем обратно к абонентам.

Число входных линий в абонентских мультиплексорах  $N$  может меняться от 2 до нескольких десятков и сотен. Типичным примером является мультиплексор ИКМ – 30/32. В практике используются и мультиплексоры РСМ – 4, РСМ – 8 на 4 и 8 каналов соответственно, в которых используется кодирование 2B1Q и адаптивная дифференциальная импульсно – кодовая модуляция.

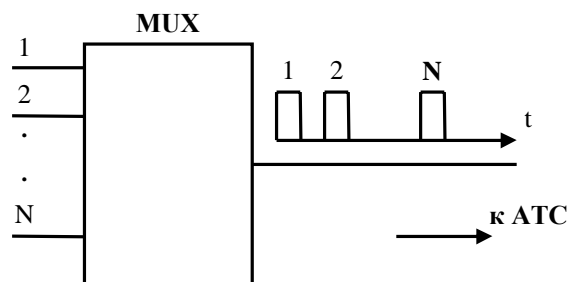


Рисунок 7.14 - Абонентский мультиплексор (MUX)

*Гибкие мультиплексоры.* Это мультиплексоры с большим набором функций и возможностей объединять и перераспределять различные входные сигналы. Так они могут выделить (вставить) из цифрового потока переменное количество каналов, могут осуществлять функции кросс – коннектора, т. е. программируемое переключение цифровых каналов как от одного входа к другому, так и к главным выходным потокам. Объединяемые (разделяемые) сигналы могут быть различными (цифровые потоки  $n \times 64$  Кбит/с, E1 (2 Мбит/с), V24/RS232, ISDN – BRI, xDSL, V35, аналоговый телефон, Ethernet и др.). Физические интерфейсы тоже разнообразны (электрические двух и четырехпроводные окончания, оптика, радиоканалы).

Рассмотрим несколько примеров реализации гибких мультиплексоров.

1. Разделение цифрового потока на несколько компонентных потоков (рисунок 7.15)

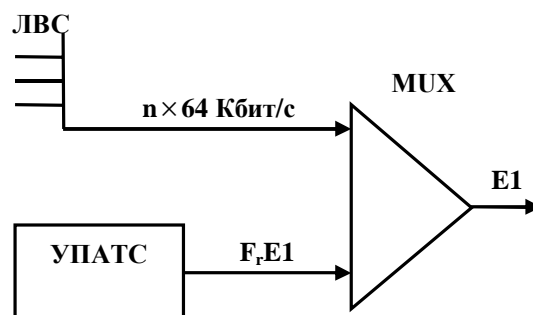


Рисунок 7.15 - Мультиплексор доступа

Здесь поток E1 (2 Мб/с) разделяется на два. Один из них емкостью  $n \times 64$  Кбит/с обеспечивает передачу данных от локальной вычислительной сети (ЛВС), а другой обслуживает учрежденческую АТС (УПАТС).

Гибкость мультиплексора заключается в том, что  $n$  может меняться от 1 до 31. В другом канале (Fractional E1) передаются оставшиеся цифровые каналы ( $31 - n$ ).

2. Мультиплексор с интегрированием мультимедийного трафика (рисунок 7.16)

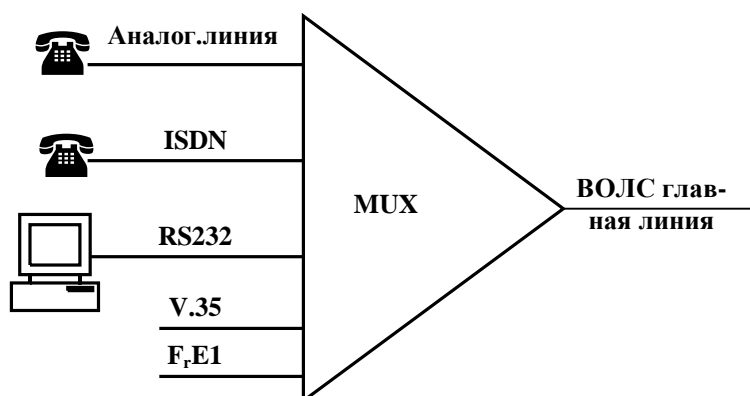


Рисунок 7.16 - Мультиплексор для объединения разнородного трафика

Этот мультиплексор является более функциональным по сравнению с предыдущим. Здесь большое число входных портов, но что более важно, их назначение разнообразно. Здесь есть входы для обычных аналоговых телефонных линий, предусматривающих аналогоцифровое преобразование в цифровой сигнал со скоростью 32 Кбит/с и меньше. Есть входы для подключения компьютеров (V24/RS232), для скоростной передачи данных (до 2 Мбит/с) – V.35. Наконец, можно мультиплексировать потоки ISDN – BRI или просто часть цифрового потока E1. По главной линии идет результирующий цифровой поток. Его скорость может быть различной от 2 Мбит/с до  $n \times 2$  Мб/с в зависимости от типа мультиплексора.

3. Мультиплексор с функциями кросс – коннектора (рисунок 7.17)



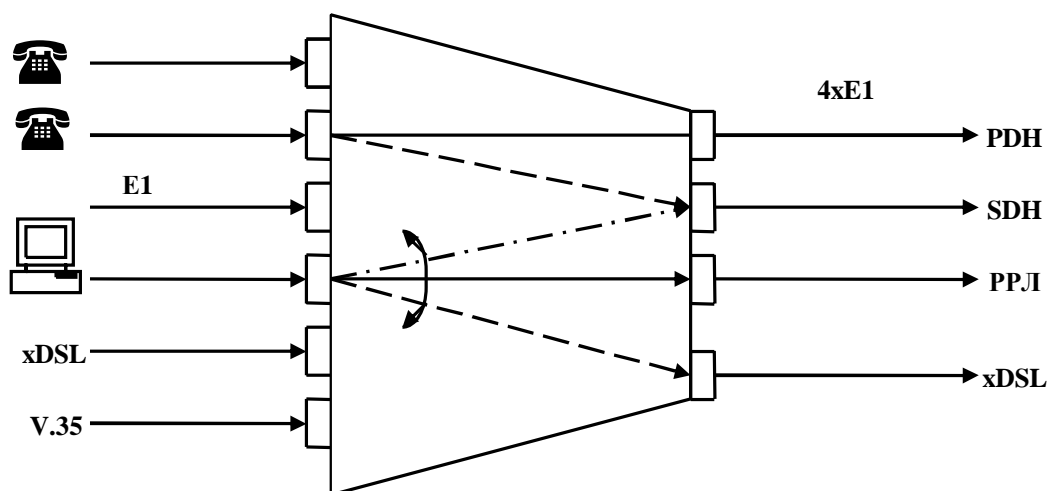


Рисунок 7.17 - Интегральный узел доступа

Здесь, как и в предыдущем случае на входе допустимы различные виды трафика, но мультиплексор (узел доступа) имеет четыре выхода. Трафик со входных портов может быть направлен на любой выходной порт. Эта процедура реализуется программным способом без блокировок и с созданием резервных маршрутов в случае неисправностей. Число входных каналов достаточно велико (например, узел Megarplex – 2200 фирмы RAD допускал 1200 каналов по 64 Кбит/с).

*Выносные концентраторы.* Эти устройства выполняют функции абонентских мультиплексоров с той лишь разницей, что для аналого – цифровых концентраторов входные линии могут быть аналоговыми, а выходные цифровыми (PDH или SDH) (рисунок 7.18).

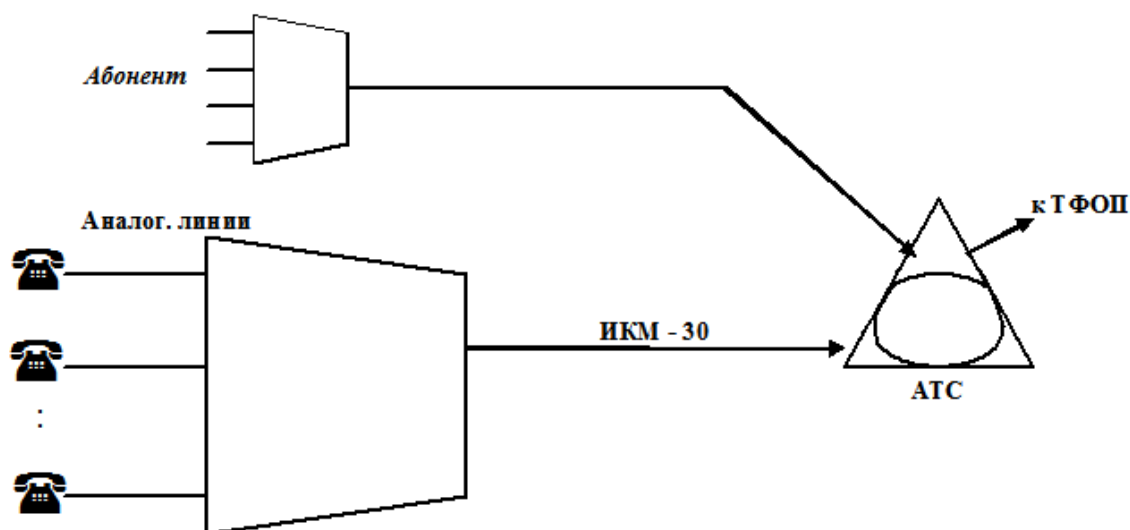


Рисунок 7.18 - Выносной концентратор

Основной характеристикой концентратора является коэффициент концентрации – отношение количества входящих каналов (К) к количеству исходящих I. Например, при объединении 64 аналоговых линий в один поток Е1 (ИКМ - 30)

$$\frac{K}{I} = \frac{64}{30}.$$

Основные функции концентратора: аналого – цифровое преобразование сигналов канала ТЧ, временное группообразование, согласование протоколов сигнализации в парах абонент – концентратор и концентратор – АТС. Преимущества концентратора заключаются в том, что теперь для удаленных абонентов не надо прокладывать абонентские линии значительной протяженности до АТС. Их можно заменить более короткими линиями до концентратора. К недостаткам таких устройств следует отнести излишнюю загруженность выходных линий соединениями местного значения, когда абоненты, подсоединенные к одному концентратору связываются между собой.

В связи с этим широко применяются более функциональные концентраторы, в которых функции мультиплексора совмещаются с функциями коммутации. Если такой концентратор наделяется еще и функциями управления, то он, по сути, превращается в цифровую АТС (удаленный коммутационный модуль).

Количество абонентских линий, включаемых в один удаленный коммутационный модуль, может измениться от 500 до 2000. Для связи модулей с АТС необходимы волоконно – оптические линии со скоростями передачи 34 – 155 Мбит/с.

**Цифровые учрежденческие и мини АТС.** По своему назначению это тоже узлы доступа, функционально подобные удаленным коммутационным модулям с той лишь разницей, что предназначены они для корпоративных сетей связи, что допускает гораздо больше сервисных функций.

*Учрежденческие АТС (УАТС)* представляют собой коммутационные станции различных типов и емкостей, предназначенные для организации внутрипроизводственной телефонной связи по сокращенной нумерации, а также для предоставления выхода в телефонную сеть общего пользования и междугородней связи по отдельным номерам. Сокращенный внутристанционный номер не является добавочным и совпадает с последними цифрами городского абонентского номера.

Вместе с тем УАТС являются и концентраторами нагрузки поскольку число входных портов (со стороны абонентов) превышает число выходных. Коэффициент концентрации для различных типов УАТС и мини АТС невелик и меняется от 2 до 12. Число же входных портов может меняться значительно:

- 1) 6000 – 20000 (большой емкости) - районные АТС
- 2) 100 – 6000 (средней емкости) – подстанции и удаленные коммутационные модули

3) менее 128 – (малой емкости) – офисные АТС.

Подключение УАТС к ближайшим цифровым АТС ТФОП в зависимости от их емкости производится по линиям ISDN  $n \times \text{BRI}$  ( $2\text{B}+\text{D}$ ) или  $n \times \text{PRI}$  ( $30\text{B}+\text{D}$ ).

Сервисные возможности цифровых УАТС очень широки и зависят от типа оконечного оборудования абонента. Наиболее ограничены они для аналогового телефонного аппарата и наиболее полны для терминалов ISDN (цифровой телефон, мини АТС). Функциональные возможности цифровых АТС приведены на рисунке 7.19

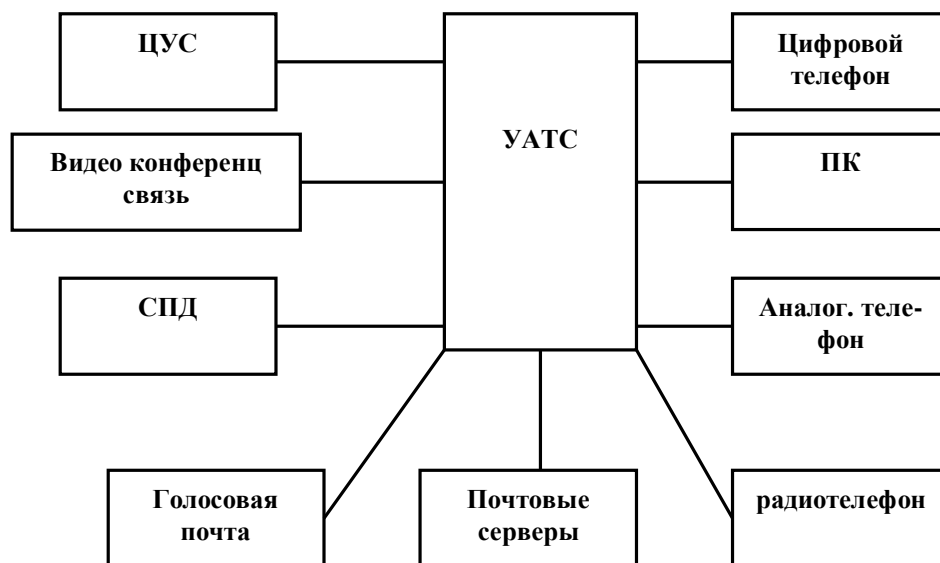


Рисунок 7.19 - Функциональные возможности цифровых УАТС

Вот некоторые важные сервисы УАТС:

- гибкое конфигурирование (количество и тип линий);
- специализированное программное обеспечение для различных видов деятельности;
- самодиагностика АТС;
- перехват звонков;
- перенаправление вызова на другой телефон;
- конференцсвязь;
- создание “бизнес - групп”;
- ограничение на входящие и исходящие выходы;
- call – back – автоматическое соединение с “занятым номером”.

Большим достоинством цифровых УАТС является возможность тарификации – учета расходов на связь. Одновременно с определением стоимости телефонных переговоров, современные тарификационные системы могут определять и другие параметры вызова (автор, внешняя линия и др.)

## 7.4 Доступ к сетям передачи данных

В сетях передачи данных (СПД) роль АТС играет узел маршрутизации (маршрутизатор), к портам которого подходят соединительные линии от узлов доступа (узлов концентрации нагрузки). Узлов распределения услуг на сетевом уровне нет. Распределение услуг в стеке протоколов TCP/IP происходит на верхних уровнях.

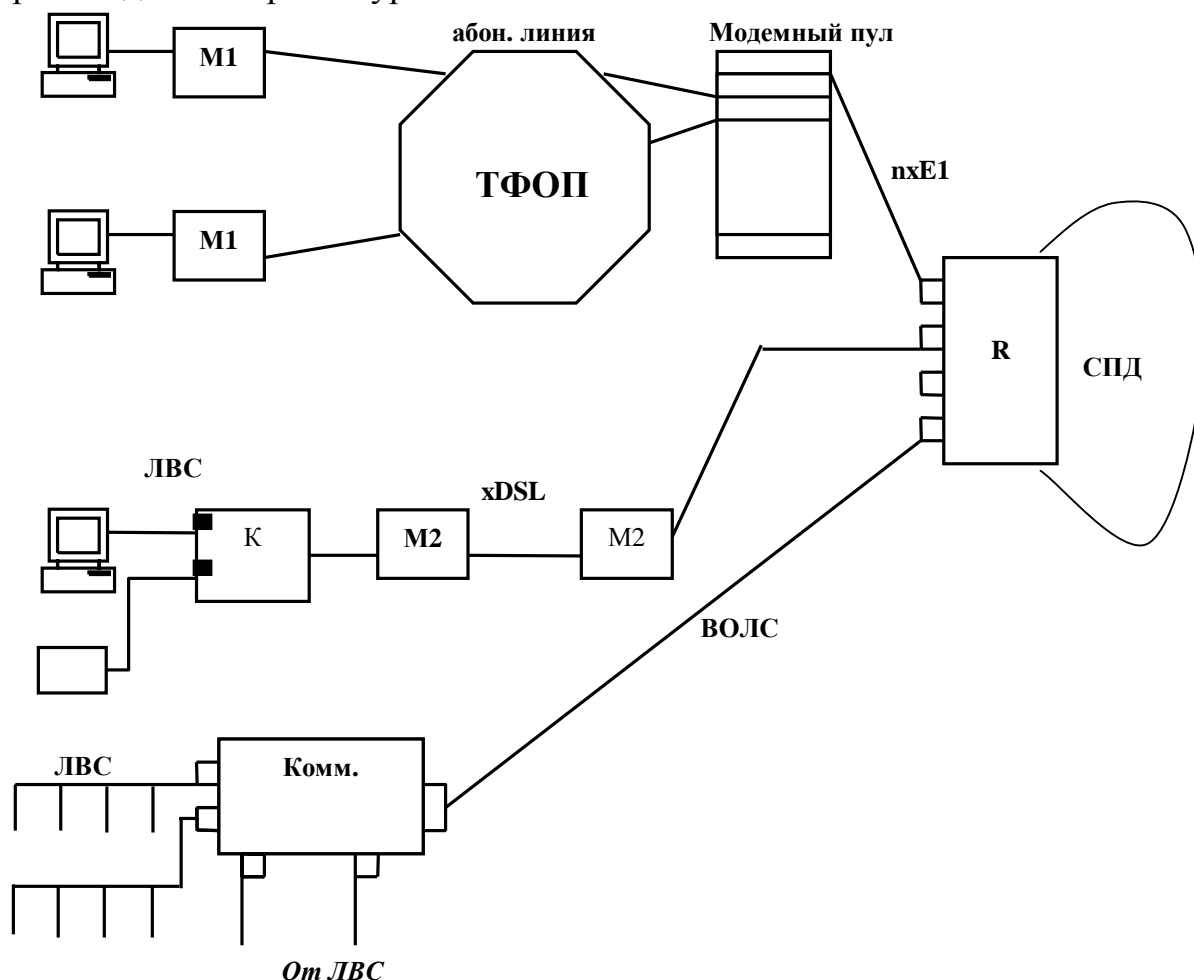


Рисунок 7.20 - Организация доступа к сетям передачи данных

Различные способы доступа к СПД представлены на рисунке 7.20.

Первый способ (dial up) осуществляется с помощью коммутируемых телефонных абонентских линий с помощью абонентских модемов M1 и модемного пула (совокупность модемов), расположенного на узле доступа. Модемный пул содержит от нескольких десятков до нескольких сотен модемов, имеющих один серийный телефонный номер. При наборе серийного номера абонентом его модем соединяется с любым свободным модемом на узле. Выход модемного пула подключен по цифровым каналам  $n \times E1$  к порту маршрутизатора R. Скорость передачи и приема информации – десятки Кбит/с.

Второй способ реализуется для локальных вычислительных сетей (ЛВС) предприятий и организаций и отдельных абонентов. Здесь узлом доступа является концентратор (хаб) К, выход которого по скоростной линии x\_DSL подключен к маршрутизатору. Такой режим доступа абонентов (Ethernet) – является равноправным и случайным и поэтому сопровождается коллизиями (конфликтами). Вместе с тем он достаточно прост и дешев и широко применяется в компьютерных сетях. Скорость передачи данных может достигать от нескольких Мбит/с (Ethernet), до нескольких десятков Мбит/с (Fast Ethernet). Расстояние от станций (компьютеров) до концентратора до 100 м при использовании в качестве линии передачи витой пары и до 2000 м при использовании оптоволокну. Число портов концентратора невелико (до 72), но, включая их каскадно или по топологии “дерево”, можно достичь значения 1024.

Третий способ аналогичен предыдущему. Он также предназначен для подключения к узлу СПД ЛВС, но в качестве узла доступа применяется коммутатор (switch). Основное достоинство этой схемы – отсутствие коллизий, поскольку коммутатор в отличие от хаба не транслирует пакеты с входного порта на все остальные, а создает соединение только с получателем по известному MAC адресу. В качестве соединительной линии здесь могут применяться как ВОЛС так и xDSL линии и цифровые РРЛ. Длина линии от абонента до узла может достигать 2 км для многокодowego оптоволокну.

Второй и третий способ работают на основе постоянного соединения (выделенная линия – on line) в отличие от первого, когда необходимо коммутируемое соединение через ТФОП. Скорости передачи данных здесь существенно выше и могут достигать 100 Мбит/с (Fast Ethernet) и 1000 Мбит/с (Gigabit Ethernet).

## **7.5 Интеграция услуг и сетей доступа**

Интеграция услуг и соответственно сетей доступа может быть реализована на двух уровнях. На первом, узкополосном, объединяются голосовой трафик и трафик передачи данных. На втором, широкополосном, объединяются телевидение, скоростная передача данных и, при необходимости, телефония.

Далее рассмотрим эти случаи подробнее.

### **7.5.1 Интеграция с помощью цифровых каналов (технология ВРК).**

Здесь в качестве узла концентрации и узла распределения услуг (УРУ) выступает гибкий мультиплексор МИХ (рисунок 7.21) или мини АТС.

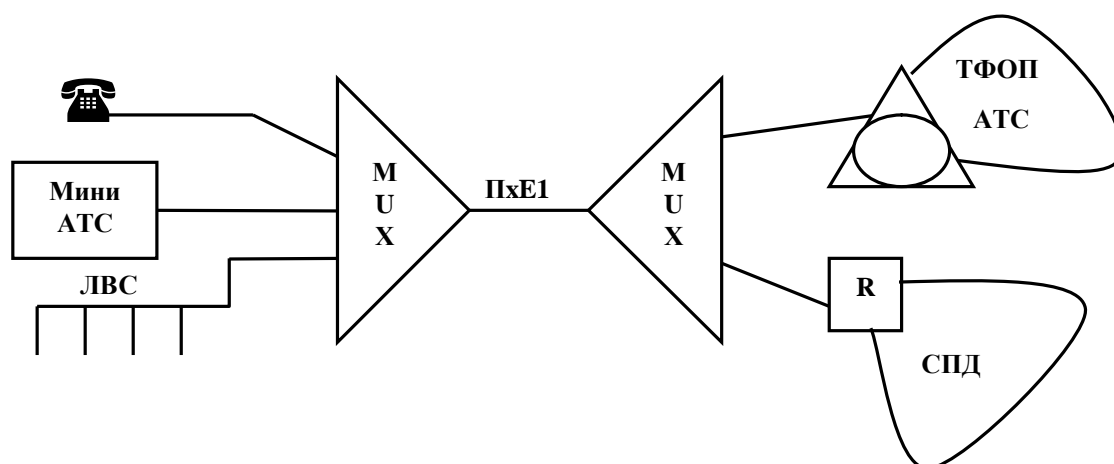


Рисунок 7.21 - Интеграция услуг с помощью мультиплексора

Сигналам телефонии и локальной вычислительной сети ЛВС отводятся свои каналные интервалы в цифровых потоках Е1. На стороне узла доступа стоит другой мультиплексор (демультиплексор), который выполняет функции разделения сигналов телефонии в сеть ТФОП и передачи данных в СПД. В качестве узлов предоставления услуг (УПУ) здесь выступают АТС и маршрутизатор R соответственно.

К недостаткам такого способа интеграции относятся:

1. Низкая загрузка цифровых каналов, как для телефонного трафика, так и для передачи данных;
2. Высокая стоимость оборудования (MUX) и цифрового канала.

В связи с этим такие услуги, как правило, используются крупными предприятиями и организациями, имеющими большой трафик. Кроме того такие решения позволяют создавать корпоративные телефонные сети и сети передачи данных. Для этого телекоммуникационные узлы (рис.7.21) должны быть развернуты в нескольких местах на базе ТФОП и СПД регионального или межрегионального оператора.

К этому же способу интеграции относится ранее рассмотренная технология ISDN (раздел 7.3.2). При ISDN – BRI число мультиплексируемых каналов – 2 со скоростью 64 Кбит/с каждый, а при ISDN – PRI их 30х64 Кбит/с.

В принципе такая схема допускает и передачу видео (например, по запросу). Для этого видеосигнал должен “оцифровываться”, подвергаться сжатию для уменьшения скорости передачи до 2 – 4 Мбит/с (технология MPEG – 2, MPEG – 4) и после этого подаваться на более скоростной мультиплексор. Препятствием применения этой цифровой технологии является высокая стоимость оборудования как на стороне абонента, так и на стороне узла.

### 7.5.2 IP – телефония (Технология коммутации пакетов)

Основой технологии пакетной телефонии является разбиение трафика “оцифрованного” речевого сигнала на пакеты и затем их передача вместе с пакетами данных. В этом случае пропускная способность канала передачи используется более эффективно, поскольку в нем можно передавать несколько разговоров, а паузы заполнять пакетами компьютерных сетей (данных).

Таблица 7.2 Требования к системам передачи пакетов

Характеристики Услуги	Допустимая задержка, мс	Вероятность потери пакета	Скорость передачи, Кбит/с
Речь (телефон)	<150	0.05 – 0.1	6 - 8
Данные	Не критично	0	30 - 100000

Требования к системам передачи пакетов для обоих видов трафиков приведены в таблице 7.2. Из нее видно насколько эти требования противоречивы. Если для передачи речи задержка (время передачи от абонента к абоненту) не должна превышать 150 мс, то для передачи данных она не существенна. Это требование является самым серьезным для пакетной телефонии, поскольку по вероятности ошибки и скорости передачи требования к речевому трафику намного мягче.

Поскольку технологии коммутации пакетов разнообразны, то и способов пакетной телефонии тоже несколько:

$V_0$  FR (голос поверх Frame Relay)

$V_0$  IP (IP - телефония)

$V_0$  ATM (голос поверх ATM).

Наибольшее распространение получила IP – телефония, технологии которой непрерывно развиваются. Основными проблемами, которые приходится решать при внедрении IP – телефонии, являются:

1. Удовлетворение условий по задержке ( $\tau_3 < 150$  мс). Эта проблема стоит более остро, чем в обычной телефонии по следующим причинам:

- большая задержка в узлах сети (маршрутизаторах и коммутаторах), которая обусловлена временем ожидания пакета в очереди, временем записи и временем считывания;
- влиянием операционной системы маршрутизатора на скорость обработки речевых сигналов, на установление соединения, на доступ к IP - сети;
- влиянием кодера речи, который в процессе кодирования должен записать фрагмент речи (совокупность отсчетов) и проанализировать его с точки зрения возможности сжатия информации.

2. Сигнализация. Установление соединения в системах IP – телефонии предполагает преобразование номера телефонной сети в IP – адрес.

3. Качество обслуживания. Скорость установления соединения, ошибки при передаче пакетов, переменная задержка при передаче.

Наиболее проработана технология IP- телефонии по рекомендации ITU – Т Н.323. Схема сети IP – телефонии по этой рекомендации приведена на рисунке 7.22

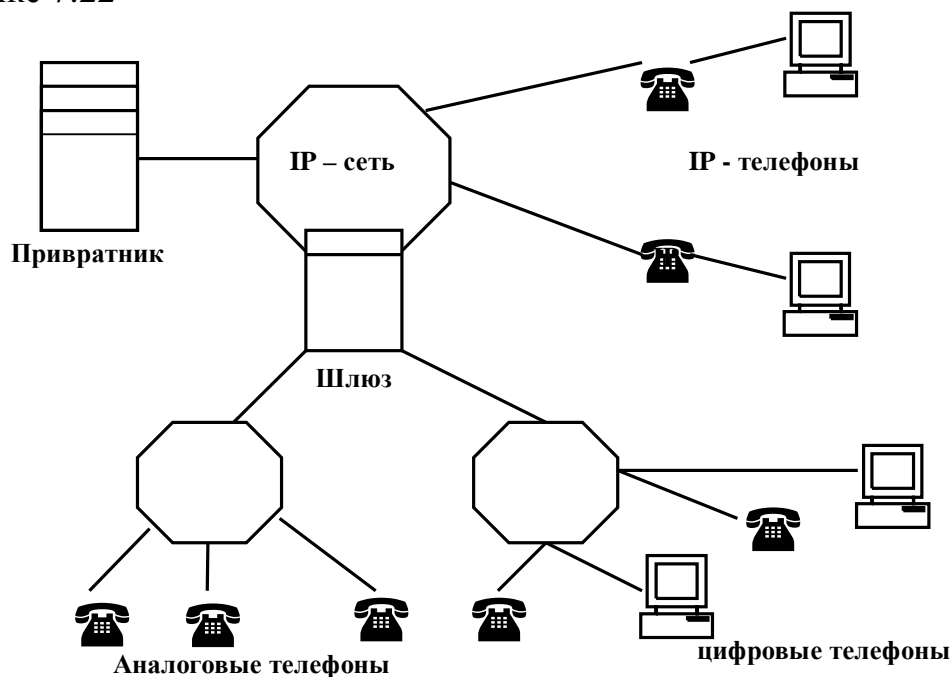


Рисунок 7.22 - Архитектура сети Н. 323

Здесь возможны следующие варианты:

- общение IP телефонных абонентов только через IP сеть между собой (модель “компьютер - компьютер”);
- общение IP телефонных абонентов с абонентами ТФОП или ISDN через шлюз (модель “компьютер - телефон”);
- общение абонентов, принадлежащих к разным узлам ТФОП через IP сеть и совокупность шлюзов (модель “телефон - телефон”).

Рассмотрим основные элементы сети:

IP – телефон или терминал Н.323 (рисунок 7.23)

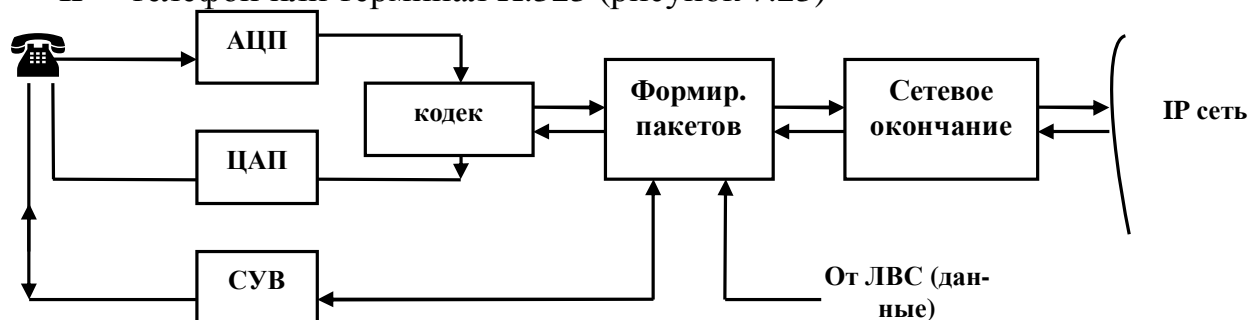


Рисунок 7.23 - Структура IP – телефона



Он включает в себя телефонную трубку (микрофон + динамик), устройства аналого – цифрового преобразования, кодек для сжатия цифрового сигнала со скоростью 64 Кбит/с до значений 6·16 Кбит/с, устройство пакетизации/ депакетизации и сетевое окончание. Наряду с речевыми пакетами IP – телефон передает сигналы управления и взаимодействия (СУВ), с помощью которых обеспечивается регистрация терминала у привратника, установление и завершение соединения, открытие разговорного канала и техобслуживание.

*Шлюз Н.323* – обеспечивает передачу речевого и сигнального трафика и трафика передачи данных по IP – сети, причем на вход шлюза могут поступать как сигналы терминалов Н.323, так и сигналы аналоговой телефонии (ТФОП) и цифровой (ISDN). В двух последних случаях он преобразует речевые сигналы к виду, пригодному для передачи по IP – сети.

*Привратник* – это специализированный сервер, который выполняет следующие функции:

- регистрация терминалов и других устройств;
- контроль доступа пользователей к услугам;
- преобразование телефонного номера или другой адресной информации в IP - адрес;
- контроль, управление и резервирование пропускной способности сети.

Основным достоинством IP – телефонии, особенно в схеме “телефон - телефон”, является существенное снижение затрат на передачу трафика (от 3 до 10 раз). Это позволяет значительно уменьшить тарифы при повременном учете длительности разговоров (междугородные и международные).

Другие, не менее существенные преимущества IP телефонии заключены в интеграции трафика и услуг телефонии и передачи данных. Эти потенциальные качества только начинают осмысливаться и у них большое будущее.

К недостаткам IP – телефонии относится ухудшение качества за счет задержек и пропадания пакетов. Для борьбы с этим принимаются такие меры:

- установление приоритетов для речевого трафика;
- недогрузка каналов в IP сети;
- снижение числа промежуточных узлов (хопов) на пути прохождения трафика IP – телефонии;
- применение механизмов обеспечения качества (QoS) в IP сетях, таких как RSVP, Diff – Serv, MPLS .

### **7.5.3 Сети доступа с применением ВОЛС**

Всеобщая тенденция к широкополосным услугам предполагает строительство сетей доступа с применением ВОЛС. При внедрении волоконно-

оптических линий в системы телекоммуникаций можно выделить 4 технологии:

1. Волоконнооптическая транспортная сеть. Здесь на базе многоволоконной ВОЛС строится сеть SDH и выделенная СПД со своими узлами. Далее сеть доступа реализуется на других физических средах (многопарный электрический кабель, РРЛ и др.). Такие сети рассмотрены в предыдущих разделах (1,4).

2. На основе ВОЛС строятся соединительные линии от узлов транспортной сети до узлов доступа (рисунке 7.24)

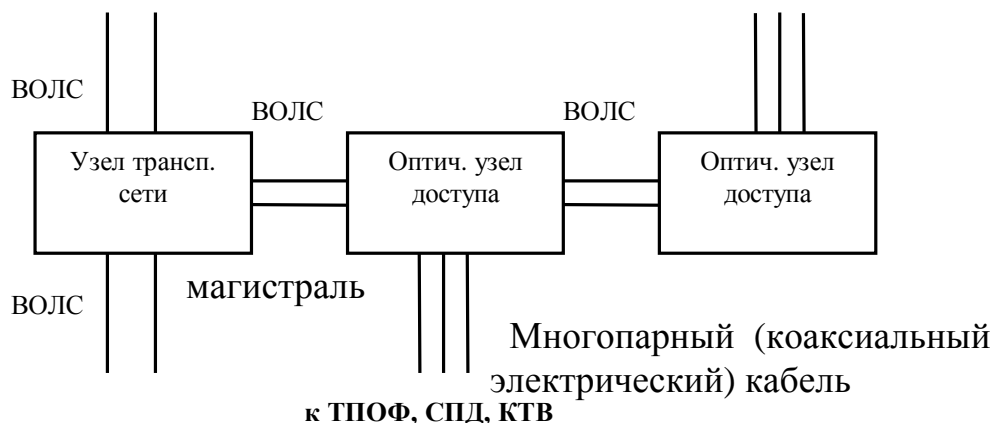


Рисунок 7.24 - Гибридная схема доступа с применением оптических и электрических кабелей

Далее оптических узлов доступа идут сети на электрических многопарных или коаксиальных кабелях. По такой схеме строятся телефонные сети с выносными концентраторами, сети передачи данных, а также сети кабельного телевидения (КТВ). Последняя схема называется гибридной волоконно – коаксиальной (HFC). Она будет рассмотрена подробно ниже.

3. Следующим шагом проникновения ВОЛС в сети доступа является доведение волокна до распределительного шкафа (РШ). Здесь чаще всего используется пассивная оптическая сеть с многозвездной структурой, где в точках разветвления помещаются оптические распределительные проссы. От распределительного шкафа к абонентам идет витая пара.

Наконец, полностью оптическая технология – «волокно в квартиру», которая заключается в том, что в распределительном шкафу стоят пассивные оптические разветвители, осуществляющие переход по топологии “звезда” от многожильного оптического кабеля, к большому количеству абонентских двухжильных.

Рассмотрим более подробно гибридную волоконно – коаксиальную сеть (рисунок 7.26),наиболее распространенную в настоящее время.

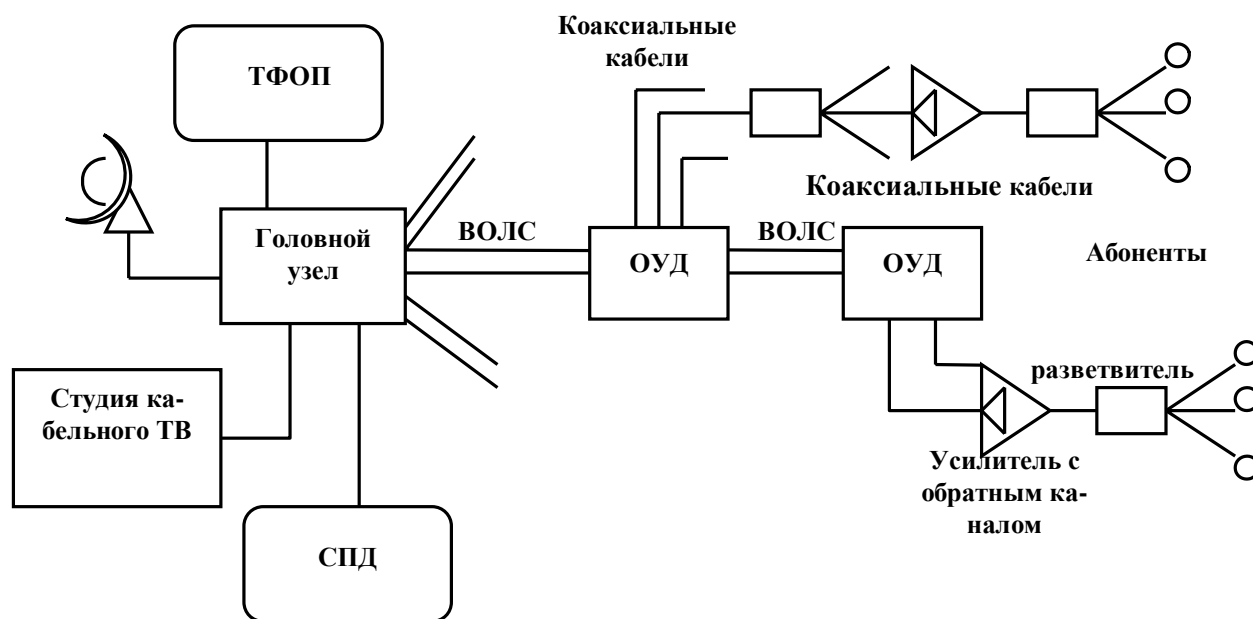


Рисунок 7.26 -Гибридная волоконно-коаксиальная сеть доступа

В этой системе головной узел собирает информацию: телефонную (от АТС), Интернет (от СПД) и видео (программы местной студии кабельного телевидения и телепрограммы центрального телевидения). Эта информация объединяется в групповой сигнал и с помощью оптического передатчика направляется в ВОЛС. Оптические сигналы передаются между оптическими узлами доступа (ОУД). В этих узлах происходит распределение сигналов в сторону абонентов по древовидной схеме с помощью коаксиальных кабелей и разветвителей.

Поскольку телефонная связь и доступ в Интернет требуют двусторонней передачи в коаксиальных ветвях применяются усилители с обратным каналом.

Формирование групповых потоков в НФС может быть как на основе временного разделения каналов (ВРК), так и частотного (ЧРК). В настоящее время, в основном применяется метод ЧРК, как менее затратный, хотя наблюдается тенденция к переходу на цифровые методы передачи.

Частотное распределение потоков показано на рисунке 7.27. Здесь запросы по Интернету и восходящий (от абонента) телефонный трафик и трафик СПД размещаются в полосе частот до 50 МГц. Нисходящие (к абоненту) цифровые потоки (СПД и телефония, цифровое ТВ, видео по запросу) располагаются в полосе частот 550 – 862 МГц. Скорость передачи информации в нисходящих цифровых потоках 30 – 40 Мбит/с обеспечивается квадратурной амплитудной модуляцией QAM – 64 и QAM – 256.

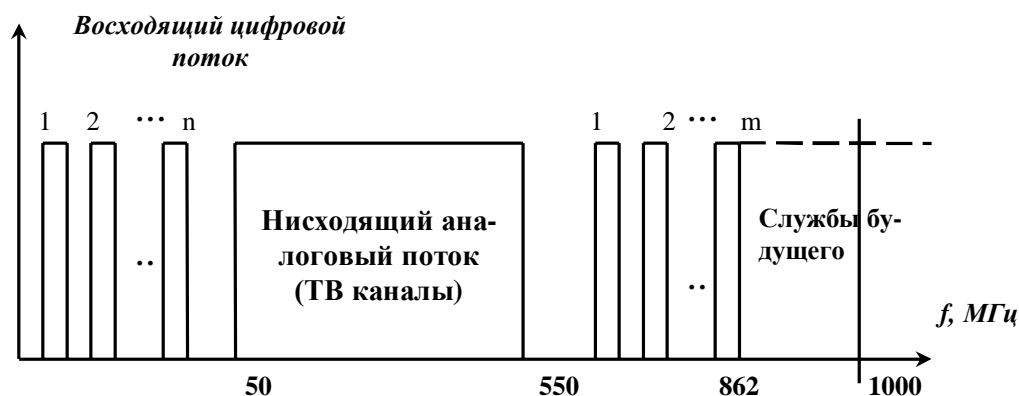


Рисунок 7.27 -Частотное распределение потоков в коаксиальной части HFC

В восходящих цифровых потоках скорость меньше (2 – 10 Мбит/с) и для ее обеспечения применяются более помехоустойчивые виды модуляции (с меньшим числом состояний) QAM – 16 или квадратурно фазовая QPSK. Такое различие в скоростях передачи и требованиях к помехоустойчивости объясняется асимметричностью трафика (к абоненту трафик больше) и тем, что уровень шумов в низкочастотной части диапазона больше. Разнесение по диапазону восходящих и нисходящих цифровых потоков проявляется еще и в том, что затухание сигнала от абонента к узлу меньше, чем в обратном направлении. Поэтому в HFC системах возможно вместо двунаправленных усилителей применять “усилители с обратным каналом”, когда сигнал пропускается в обратном канале без усиления.

Гибридные системы HFC предусматривают дальнейшее развитие с тем чтобы выровнять асимметричность, перейти только на цифровые методы передачи и универсальные платформы передачи мультимедийного трафика (ATM, IP - MPLS).

## **8. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ.**

Рассмотрев основные телекоммуникационные системы (системы передачи, системы распределения, линии связи), мы теперь должны объединить полученные знания и дать представление о планировании, построении и развитии телекоммуникационных сетей.

В связи с тем, что современные телекоммуникационные сети строятся на основе цифровых методов передачи и распределения, мы будем, в основном, рассматривать именно цифровые сети.

### **8.1 Планирование сетей.**

При планировании сетей необходимо рассматривать два основных случая:

- сеть строится заново и ее нужно планировать с “нулевого цикла”;
- сеть построена, функционирует и ее нужно развивать как количественно, расширяя емкость каналов узлов, так и качественно, внедряя новые услуги и новые технологии.

Второй подход более распространен, поскольку цифровые телекоммуникационные сети имеют как большинство региональных операторов, так и большинство крупных корпораций.

Вместе с тем оба подхода при планировании должны удовлетворять некоторым требованиям и критериям и в том числе:

- знание абонентской базы (номерная телефонная емкость, ожидаемое число абонентов сотовой связи, СПД и ИНТЕРНЕТ)
- объем внутреннего и внешнего трафика с учетом географического расположения основных производственных и жилых зон
- уровни требуемого качества услуг
- состояние существующей сети
- особенности эксплуатации (технические, климатические и др.)

С учетом этих и других специальных требований выбираются основные действия при планировании сетей:

- определение мощности узлов по полезной емкости, количеству и номенклатуре портов (SDH, PDH, Ethernet, V35 и др.)
- выбор базовых технологий передачи транспортной сети
- выбор базовых технологий и топологии сетей доступа
- обеспечение управления
- обеспечение надежности и резервирования
- планирование эксплуатационно-технического обслуживания
- многоэтапное проектирование и бизнес планирование

Многоэтапность проектирования предполагает оптимизацию топологии сети и оптимизацию сети по стоимости. Оптимизация топологии транспортной сети основана на анализе структуры сети, распределения

трафика между узлами и оптимизация по заданным критериям (стоимость, качество и т.п.). На основе задаваемого исходящего от абонентов трафика составляется матрица распределения трафика между узлами и сравнивается с нормативом. Нормы загрузки сети разные для разных каналов. Так для абонентов аналоговой телефонной сети норма составляет 0,05 Эрланга. Обычно загрузка трактов между узлами определяется количеством цифровых потоков E1.

При проектировании сетей кроме пропускной способности необходимо также обеспечить должный уровень качества. Современные технологии передачи и распределения информации можно разделить на две группы:

- с неконтролируемым качеством обслуживания
- с контролируемым качеством обслуживания

К первой группе относятся технологии, обладающие большим запасом по пропускной способности. Это, например, многоволоконные ВОЛС в сочетании с SDH (STM-16, STM-64) или Gigabit Ethernet. В этих примерах некоторым недостатком является ограничение производительности мультимплексоров ввода-вывода и коммутационных станций, но в некоторых пределах она наращивается путем добавления новых модулей или заменой на более производительное оборудование. По такому пути развития идет большинство операторов ТФОП и СПД.

Во второй группе качество обеспечивается разными способами. Большинство из них было рассмотрено ранее. Это создание приоритетов в очередях, протокол RSVP, задание категорий качества в сетях Frame Relay и ATM. Все эти методы имеют пока ограниченное применение, особенно в массовых телекоммуникационных технологиях.

## **8.2 Примеры телекоммуникационных сетей.**

Современные магистральные телекоммуникационные сети строятся, как правило, на основе волоконно-оптических линий связи с применением либо технологий ВРК-SDH, либо ЧРК(аналоговое кабельное телевидение), либо передачи пакетов(ATM, Gigabit Ethernet и д.р.). Рассмотрим в качестве примеров сети, реализуемые в Томской области.

### **8.2.1 Цифровая телекоммуникационная сеть SDH**

Цифровая телекоммуникационная сеть SDH (рисунок 8.1) строилась поэтапно. В начале было построено волоконно-оптическое кольцо в г. Томске на базе 16-ти волоконного оптического кабеля и транспортных единиц STM-1, которое объединило 5 АТС. В качестве узлового оборудования были использованы мультимплексоры ввода-вывода (МВВ). К этому кольцу были подключены цифровые АТС, выносные концентраторы (ВК) и узлы наложенной сети передачи данных (СПД). Основной нагрузкой этой сети был телефонный трафик между АТС. В последствии с развитием систем

сотовой связи нагрузка на сеть увеличилась за счет трафика мобильной связи систем NMT-450 и GSM.

В связи с этим происходила модернизация сети путем введения на кольцо модулей STM-4, STM-16, строительства дополнительного кольца, примыкающего к первому, новых цифровых АТС и выносных концентраторов, которые на рисунке не показаны.

Областной сегмент сети был выполнен на основе ВОЛС и цифровых радиорелейных линий (ЦРРЛ) в виде магистрали, последовательно соединяющей МВВ, находящиеся в районных центрах и крупных населенных пунктах, расположенных вдоль основной водной магистрали (река Обь). Основные потребители трафика те же самые, что и в городе (АТС, узлы СПД, узлы сотовой связи). В настоящее время эта магистраль для обслуживания других районов и с целью резервирования будет охвачена двумя полукольцами.

Пропускная способность всех волоконно-оптических компонентов реализуется с большим запасом, поэтому при планировании и проектировании сети основной задачей было рациональное распределение цифровых потоков с помощью МВВ.

### **8.2.2 Сеть передачи данных**

Сеть передачи данных выполнена по комбинированной схеме путем построения выделенной магистральной сети с дополнением ее сегментами, наложенными на цифровую сеть SDH-PDH (рисунок 8.2). Здесь реализовано волоконно-оптическое кольцо, соединяющее коммутаторы Gigabit Ethernet. Использование коммутаторов в опорной части сети обеспечивает высокие скорости передачи данных и экономичное использование оптических линий связи. К коммутаторам подключены маршрутизаторы высокого уровня. Их применение обеспечивает функционирование сети на третьем (IP) уровне и высокую защищенность как непосредственно сети передачи данных, так и данных абонентов от несанкционированного доступа.

К коммутаторам опорного кольца также по волоконно-оптическим каналам связи подключены коммутаторы Fast Ethernet или Gigabit Ethernet по радиальной схеме. В составе узлов СПД как правило присутствуют маршрутизаторы Mi, к портам которых подключаются фрагменты сетей доступа (модемные пулы dial up, модемные мультиплексоры ADSL(DSLAM) или просто абоненты, работающие по выделенным оптическим или медным(DSL) линиям).

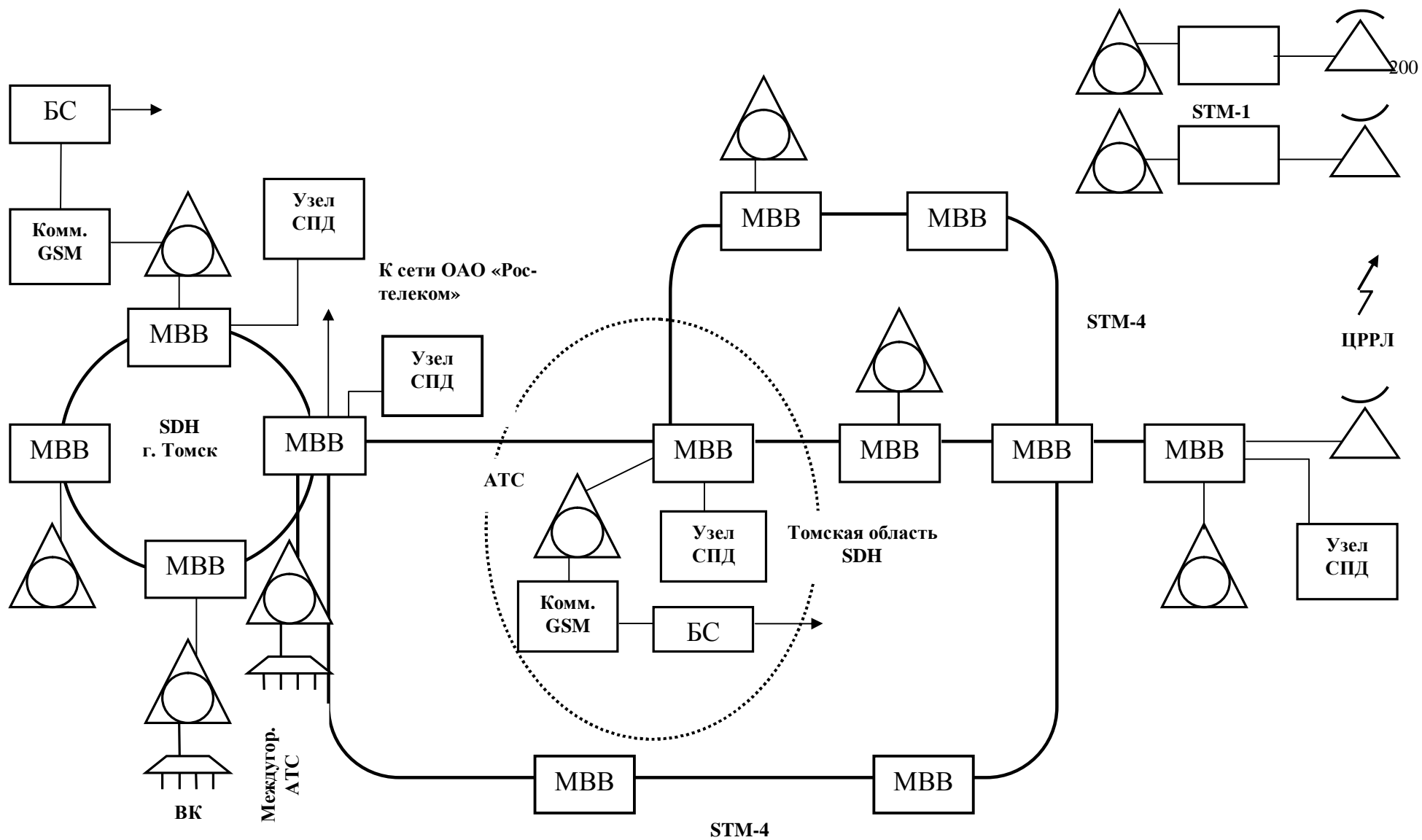
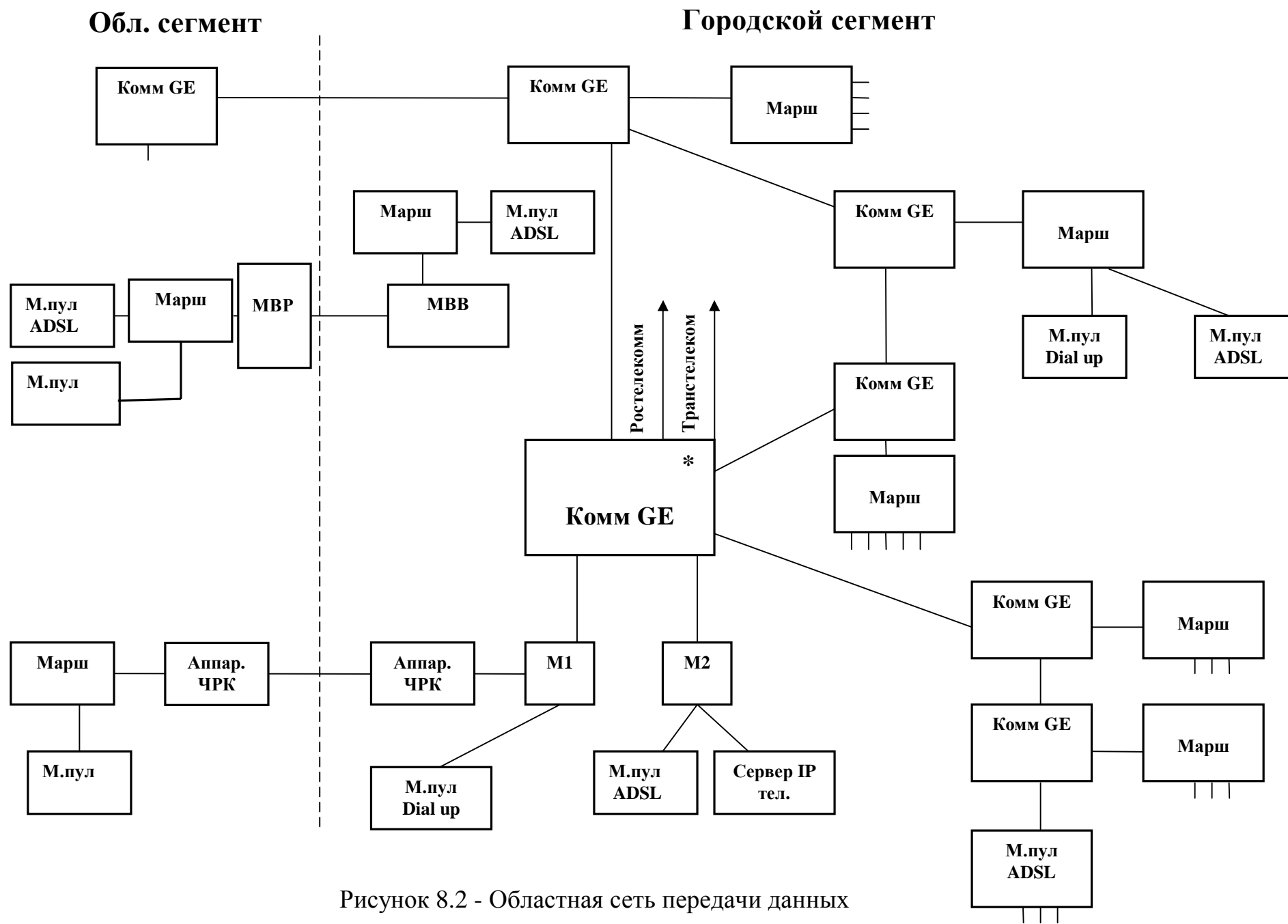


Рисунок 8.1 - Цифровая сеть SDH





Наиболее мощный узел СПД - \* помимо того, что он собирают значительную долю трафика сети, осуществляет функционирование наложенной сети СПД. Это реализуется либо на потоках n\*E1 через цифровую сеть SDH и мультиплексоры ввода вывода, либо через аналоговую телефонную сеть и аппаратуру ЧРК, объединяющую некоторое количество каналов тональной частоты. По этой технологии работает областной сегмент СПД и некоторые узлы в городе.

Кроме этого к центральному узлу подключен сервер доступа IP-телефонии и порты выхода в сеть передачи, двух независимых внешних операторов. Таким образом, обеспечивается надежное резервирование внешнего канала.

Сеть передачи данных также используется как опорная сеть для организации корпоративных сетей различных организаций, как в пределах города, так и по области и всей России. В этом случае для абонентов организуется своя виртуальная сеть поверх СПД. Такая сеть позволит осуществлять взаимодействие между удаленными адресами со скоростями 2\10\100\1000 Мбит\с. и обеспечит прозрачность сетевых сервисов.

### **8.3. Перспективы развития сетей.**

Развитие телекоммуникационных сетей прежде всего связано с развитием услуг и качеством их предоставления. Сейчас на ряду с традиционными услугами (телефония, телевидение, радиовещание) появилось и появляется много новых: доступ к ресурсам Интернет, электронная почта, видео по запросу, электронная торговля, игры по компьютерным сетям и многое другое. Многообразие услуг породило много новых понятий и требований к сетям, существенно преобразует экономические отношения участников информационного и телекоммуникационного бизнеса.

Одним из новых понятий стало понятие “контента”, т.е. информационного содержания телекоммуникационных потоков. По одному из определений “Контент - это данные, преобразованные в любую форму, предназначенные для хранения или передачи с целью востребования во множестве случаев”. Основными видами контента являются:

- аудиосодержание (аудио) – звуковые композиции
- видеосодержание (видео) – визуальные композиции, которые могут объединяться со звуковыми
- синтеосодержание – ряд двух или трехмерных объектов, полученных химическим или механическим способом (книги, произведения искусства и т.д.)
- медиасодержание (медиа) – объединение текстовых, звуковых и визуальных композиций для совместного отображения.

Передача этих видов контента может осуществляться по разному, например почтой, но мы рассматриваем только телекоммуникационные способы, которые будут зависеть от типа контента (телефония, телевидение и т.д.), типа адресации (индивидуальная, групповая, широковещательная) и способа организации соединения (по запросу получателя-диалог, по инициативе отправителя-вещание).

Учитывая все эти факторы, а так же территориальное состояние абонента (стационарность или мобильность) оператор может оценить число необходимых телекоммуникационных потоков, возможность своих технических ресурсов, провести маркетинговые исследования на предмет востребованности услуг и только потом строить план развития сети. Таким образом, в основу развития сети ставится объем передаваемого контента (трафик), а не привлекательные технические решения.

Стремительное развитие технологий на базе постоянного соединения(DSL, кабельное телевидение и др.) принципиально меняет модель бизнеса интернет - услуг. Все дело в том, что сейчас в качестве основной расчетной единицы начинает выступать не время(минуты, часы), а объемы принятого и переданного трафика(Мегабайты). Следовательно, провайдер Интернет - услуг заинтересован размещать источники информации у себя на сервере, покупая контент у ее разработчиков (базы аудио и видео, учебные сайты и т.п.). Затем за передачу информации провайдер берет плату с абонентов. Плата за внешний трафик из других удаленных источников при этом минимизируется. Таким образом, бизнес-модель становится следующей:

Производитель товара (контента)- оптовый продавец (провайдер)-конечный покупатель(пользователь интернета).

Другой тенденцией, наряду с развитием услуг и контента, является общее существенное увеличение трафика. Этот рост обусловлен массовой телефонизацией, востребованностью услуг сотовой связи, скоростного интернета, кабельного телевидения и требует значительного (в 10, 100 раз) увеличения пропускной способности, как магистральных сетей, так и сетей доступа.

Качество оказания услуг ставится абонентами в числе главных приоритетов. При технической реализации оно определяется задержкой сигнала и нестабильностью (флуктуациями) этой задержки.

Наконец, интеграции услуг или мультисервисность предполагают доведение всех видов контента до потребителя с помощью одного коммуникационного потока и выделение из него отдельных составляющих на терминальных устройствах. Сейчас такие виды услуг как телефония, телевидение и передача данных подаются по отдельным сетям, и абонентов это устраивает. Однако в дальнейшем, с ростом числа услуг, с необходимостью увеличивать пропускную способность сетей доступа, внедрение мультисервисных сетей неизбежно.

Рассмотрим теперь проблемы системного характера, препятствующие или ограничивающие реализацию обозначенных выше тенденций:

1. Недостатки семиуровневой модели (ЭМВОС). Несмотря на то, что эта модель была принята в 1984г. и без обращения к ней сейчас невозможно построить любую открытую телекоммуникационную систему, она требует модернизации или замены по ряду причин:

- эталонный или рекомендательный характер модели, позволяет разработчикам технологий (оборудования и программного обеспечения), трактовать функции уровней с определенной свободой, что приводит к появлению множества близких технологий переноса и распределения потоков, которые в конечном итоге не всегда понимают друг друга. Оборудование разных производителей также не стыкуется между собой

- избыточность модели проявляется в дублировании функций транспортного и канального уровня по передаче пакетов в системе “отправитель” - “получатель”. Если канальный уровень работает с любым цифровым потоком, то транспортный обязан делить его по виду услуг, да к тому же берет на себя функции повторной передачи искаженных пакетов

- сложная система адресации состоит в том, что независимо существуют телефонная адресация, многоуровневая адресация в сетях передачи данных (MAC – адреса, IP-адреса, DNS). Кроме этого в IP заголовке есть адрес получателя, адрес объекта (отправителя) и адрес услуги (прикладного процесса).

2. Противоречия между эффективностью и качеством передачи:

- с одной стороны информационные потоки должны быть не коррелированы (не влиять друг на друга). Для этого применяются ортогональные сигналы в системах с разделением каналов (ЧРК, ВРК, кодовое разделение). Но, как известно, эти методы не эффективно используют канал передачи, особенно в дуплексном режиме. Методы статистического уплотнения (коммутация пакетов) и множественного доступа (CSMA/CD, и др.) повышают эффективность передачи, но не обеспечивают некоррелированность информационных потоков(очереди и др.)

- при пакетном режиме передачи для обеспечения требуемого уровня QoS (уровень и флуктуации задержки) вводит режим меток (MPLS и др.), что приводит к потере свойства выбора маршрута и делает услугу привилегированной. Кроме того, при передаче длинных пакетов трудно обеспечить приоритет для коротких

- применение режима маршрутизации замедляет процесс передачи, поскольку требует времени для анализа таблиц, которые требуется оперативно обновлять. Особенно остро это ощущается при организации резервных путей, когда маршрутизаторы выходят из строя.

3. Затруднено взаимодействие операторов использующих различные сетевые технологии и, особенно, различные протоколы сигнализации.

К другим проблемам следует отнести необходимость защиты адресных кодов, затрудненность диалога в схеме “точка” - “многоточка”.

Многие из этих проблем и противоречий на современном уровне развития телекоммуникаций не разрешены. Поэтому перспектива их развития выглядит следующим образом:

1. Необходимо применять наиболее злободневные “частные” решения.
  2. Одновременно готовить новые революционные технологии.
- Ниже рассмотрим некоторые “частные” решения.

### *Развитие волоконно-оптических технологий*

Ряд проблем и противоречий в развитии телекоммуникационных систем можно решить методом избыточности – путем существенного увеличения пропускной способности. К счастью, современные цифровые системы передачи данных позволяют это сделать. Рассмотрим стандартную схему магистральной ЦСП на основе ВОЛС и технологии SDH (рисунок 8.3).

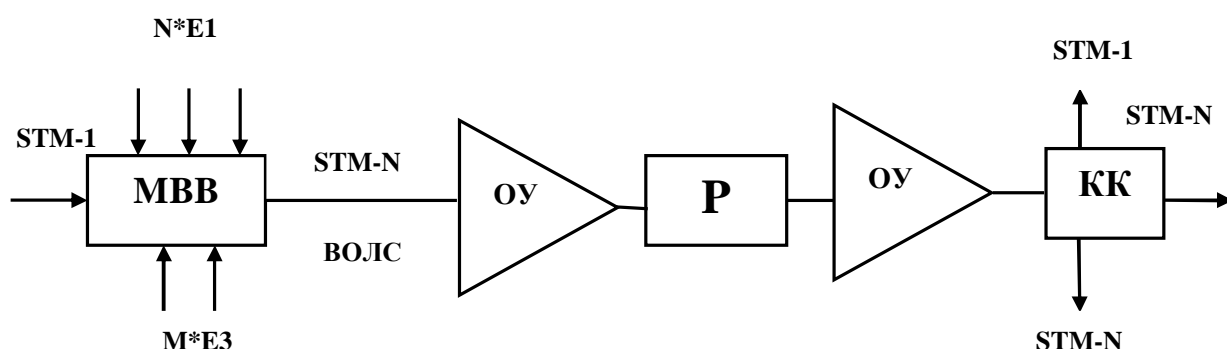


Рисунок 8.3 - ЦСП-SDH

Здесь компонентные потоки E1, E3, STM-1 и другие объединяются мультиплексором ввода-вывода (МВВ) и передаются по волоконно-оптической линии связи. Если магистраль протяженная, то для усиления и восстановления цифрового сигнала применяются оптические усилители (ОУ) и регенераторы (Р). Далее по трассе на узлах стоят либо следующие МВВ, либо кросс-коннекторы (КК).

Пропускная способность этой трассы зависит от технических характеристик всех ее элементов.

Так ВОЛС, работающая на одномодовом волокне с длиной волны света 1.55 мкм имеет полосу пропускания 0.2 мкм или 25ТГц. Это потенциальные ресурсы волокна (скорость передачи ~ 25 Тбит/с) не могут быть реализованы из-за затухания света и различных видов дисперсии. При этом может быть получена пропускная способность до 2-10 Гбит/с при расстояниях 50-100 км.

Мультиплексоры ввода-вывода стандартизированы и выпускаются со следующими скоростями линейных интерфейсов: STM-1 (155 Мбит/с), STM-4 (622 Мбит/с), STM-16 (2.5 Гбит/с), STM-64 (10 Гбит/с). Оптические усилители и регенераторы имеют полосы пропускания, достаточные для работы с такими потоками.

Дальнейшее наращивание пропускной способности систем передачи будет ограничиваться быстродействием мультиплексоров и кросс-коннекторов, несмотря на высокую потенциальную возможность оптического волокна. Поэтому для существенного повышения скорости передачи было предложено использовать частотное уплотнение (ЧРК в оптическом диапазоне (рисунок 8.4)).

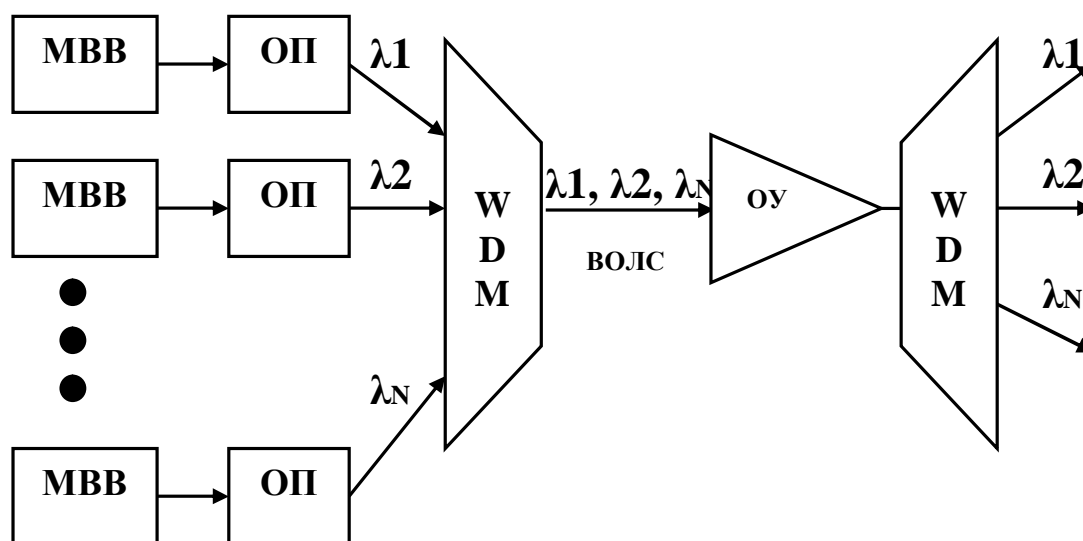


Рисунок 8.4 -Схема WDM

Здесь как и ранее MBV собирает цифровые потоки, а затем оптические лазерные передатчики преобразуют их в оптические сигналы с разными длинами волн так, чтобы их полосы не пересекались. Далее световые потоки объединяются в оптическом мультиплексоре WDM (Wavelength Division Multiplexing), передаются с усилением или без него по волокну а далее демультиплексируются и разбиваются на отдельные STM структуры.

Число N, объединяемых световых потоков STM-64, может достигать 80. При этом результирующая пропускная способность составляет фантастическую цифру (800 Гбит/с).

Далее следует учесть, что в оптическом кабеле расположено несколько волокон (от 2 до 24 и более).

#### Развитие сетей передачи данных.

В области передачи данных продолжается острейшая конкуренция технологий. Если ранее соперничали x.25, Frame Relay, IP, то в настоящее время параллельно с ними предложены и развиваются ATM, MPLS, DPT

10Гбит Ethernet и другие. Суть технологии ATM рассмотрена в разделе 6, здесь уделим некоторое внимание MPLS.

Технология MPLS (Multi Protocol Label Switching)- это технология быстрой коммутации пакетов в многопротокольных сетях основанная на использовании меток. Повышенная скорость коммутации определяется тем, что вместо анализа достаточно длинного сетевого (IP) или MAC адреса в MPLS направление пакета по маршруту осуществляется после считывания более короткой метки. Эта метка не заменяет IP и MAC адрес, а добавляется к ним (рисунок 8.5).

Заголовок Ethernet      Метка MPLS      Заголовок IP      Данные

Рисунок 8.5 Расположение метки

Многопротокольный характер метки означает, что MPLS работает по принципу инкапсуляции и может транспортировать множество других протоколов (рисунок 8.6).

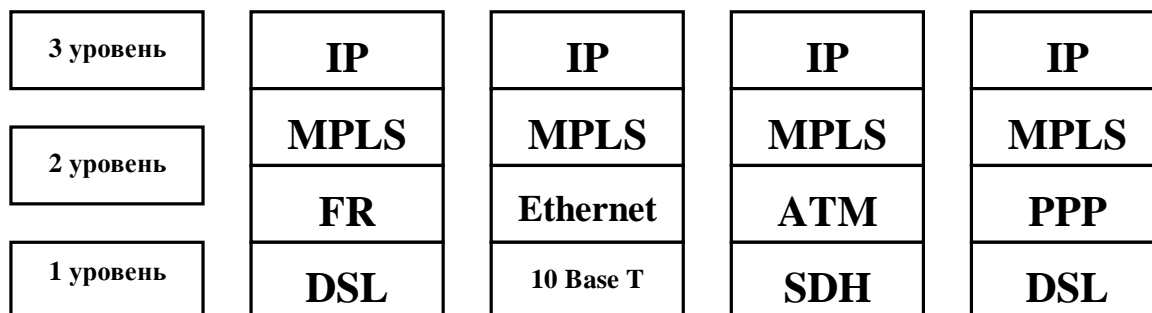


Рисунок 8.6 - Место MPLS в эталонной модели ВОС и в технологии IP

Еще одним важным достоинством MPLS является возможность обеспечения QoS. Для этого метки наделяются признаком класса обслуживания. FEC (Forwarding Equivalence Class). Более того, вводится целый стек (совокупность) меток, чтобы можно было разделить функции передачи и функции сервиса.

Фрагмент сети IP-MPLS представлен на рисунке 8.7.

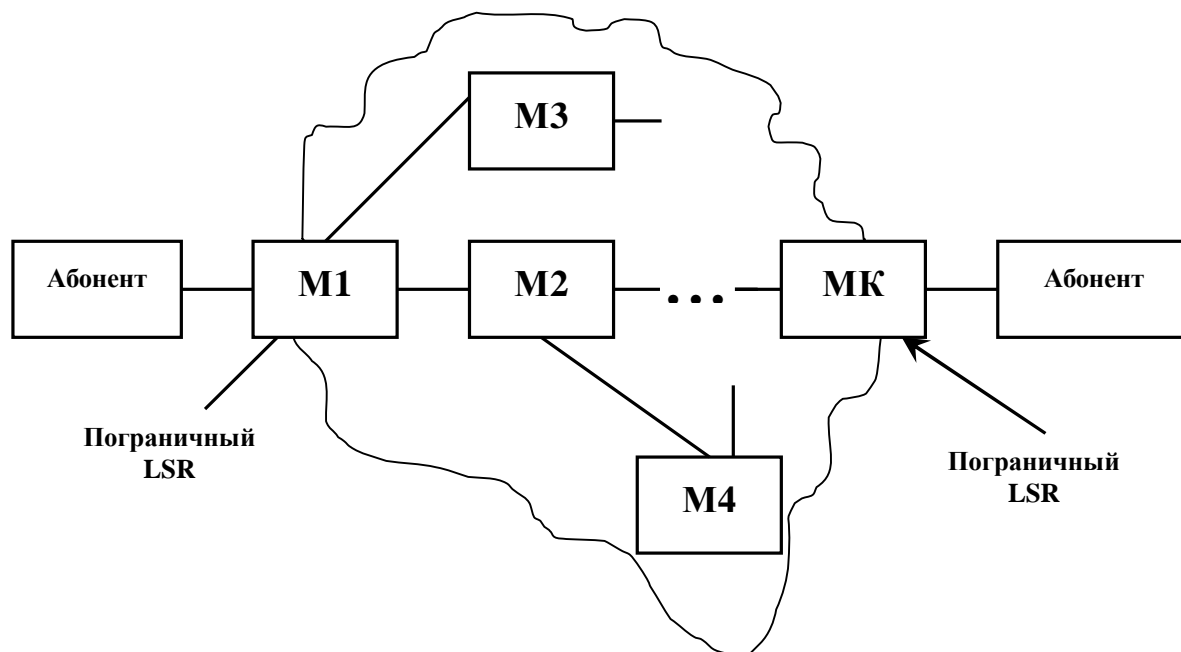


Рисунок 8.7 Сеть MPLS – IP

Сеть состоит из маршрутизаторов  $M_i$  с коммутацией меток LSR- Label Switching Router, которые направляют трафик по предварительно проложенным путям с коммутацией меток. Метка присваивается каждому пакету и содержит информацию о пути следования и о классе обслуживания. Содержание метки действует только на участке между двумя соседними LSR. LSR - это сочетание обычного маршрутизатора и высокоскоростного коммутатора. Маршрутизатор определяет топологию сети по принятым алгоритмам (OSPF, BGP и др.), выбирает рациональные маршруты, а коммутатор обеспечивает передачу пакетов с использованием меток и упрощенных локальных таблиц коммутации.

Сеть MPLS делится на две функционально различные области - ядро и граничную область. Маршрутизаторы ядра занимаются только передачей пакетов. Все функции классификации пакетов по различным FEC, фильтрации, выравнивания нагрузки, управления трафиком берут на себя пограничные LSR. Поэтому объемные и интенсивные вычисления приходятся на граничную область, а высокоскоростная коммутация на ядро.

Обеспечение QoS с помощью классов сервиса FEC позволяет передавать пакеты разных классов по разным путям и с разными приоритетами. Кроме этого механизм MPLS позволяет обеспечить дополнительные функции QoS путем сочетания с другими механизмами обеспечения качества. Например, это механизм RSVP- Resource Reservation Protocol. RSVP – это протокол сигнализации, который обеспечивает резервирование ресурсов, таких как гарантированная пропускная способность канала, предсказуемая задержка, предельный уровень ошибок и потерь. Протокол запрашивает для своего абонента у маршрутизаторов сети необходимый уровень QoS и



при наличии требуемого ресурса гарантирует данную услугу. В случае MPLS метка будет учитывать результаты RSVP переговоров и обеспечит данный качественный маршрут. Таким образом, MPLS управляет качеством услуги в транспортной сети, а RSVP в сети доступа.

Нетрудно увидеть, что MPLS-IP и ATM – две остро конкурирующие технологии. Пока соревнование выигрывает MPLS по следующим причинам:

1. Сеть IP - уже является глобальной и надстройка в виде MPLS легко внедряется и хорошо масштабируется в магистральных сетях.
2. Оборудование ATM значительно дороже, особенно для крупных узлов.
3. Несмотря на то, что в ATM изначально решены многие противоречия телекоммуникационных систем по скорости, задержкам, QoS, технология IP-MPLS успешно их решает с применением механизмов MPLS, RSVP и других.

NGN – Next Generation Networks – сети следующего поколения. К настоящему времени сложилось следующее определение NGN:

Гетерогенная мультисервисная сеть, обеспечивающая передачу всех видов медиатрафика и распределенное предоставление неограниченного спектра телекоммуникационных услуг, с возможностью их добавления, редактирования, распределенной тарификации. Сеть поддерживает передачу разнородного трафика с различными требованиями к качеству обслуживания с минимальными затратами.

Как видим, преодоление многих противоречий, описанных выше, может быть реализовано в сетях NGN. В основе концепции NGN лежат следующие положения:

- мультисервисное обслуживание абонентов (интеграция услуг телефонии, видео и передачи данных);
- поставщики услуг должны быть независимы от операторов связи, любая новая услуга должна быть доступна любому абоненту;
- транспортная сеть должна быть построена по технологии коммутации пакетов, система коммутации является распределенной;
- сеть доступа должна быть широкополосной и включать в себя все перспективные технологии (Ethernet, V.35+PPP, PDH, ATM и др.);
- управление качеством предоставления услуг.

В связи с этим можно сеть NGN представить в виде следующей структуры (рисунок 8.8). Здесь ядро транспортной сети образует сеть передачи данных, которая через медиа – шлюзы соединена с телефонной сетью общего пользования и мобильными сетями. Назначение медиа-шлюзов - преобразование информационных потоков к виду удобному для передачи по сети передачи данных.

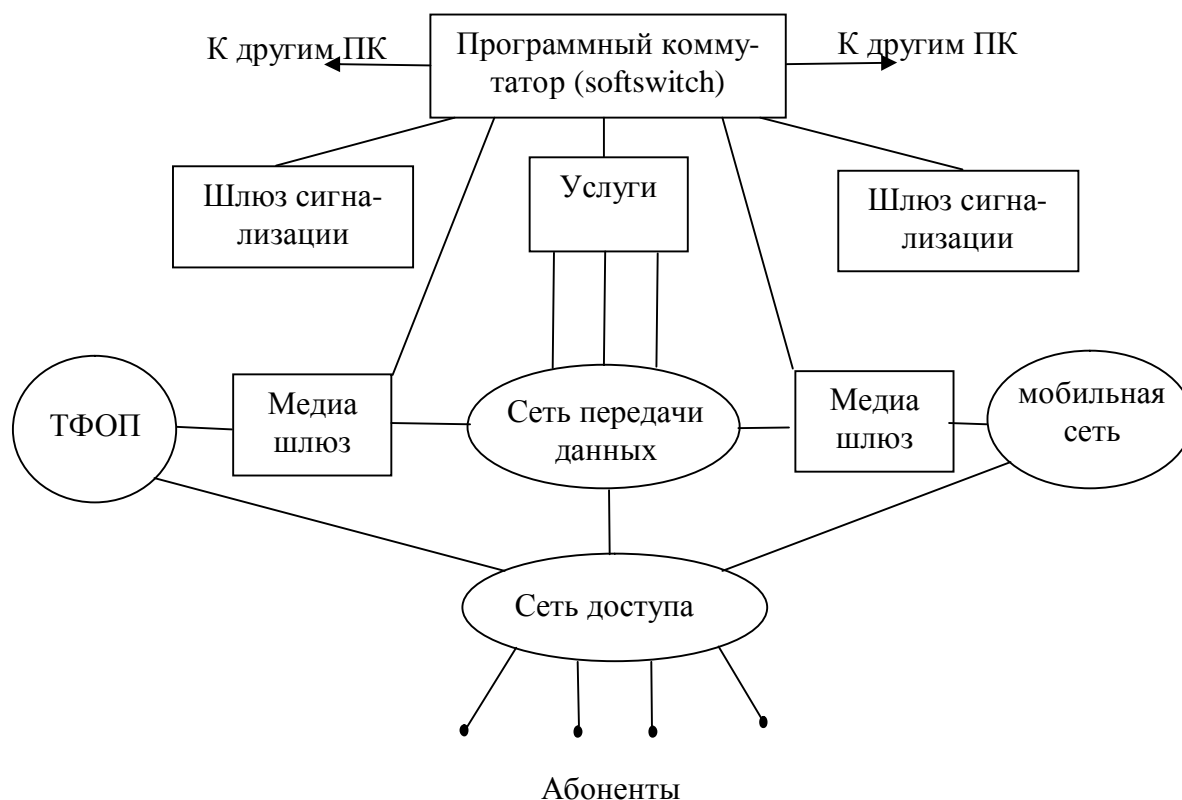


Рисунок 8.8 Структура сети NGN

Наряду с этими шлюзами существуют шлюзы сигнализации, которые согласуют процедуры установления соединения абонентов между собой и процедуры получения абонентами других различных услуг. Всем этим управляет специальный программный коммутатор (softswitch), который регулирует и установление соединения и обеспечивает подключение абонента к необходимой ему услуге.

В качестве прообраза NGN сетей чаще всего используют IP – сети. Для того чтобы это увидеть, изобразим процессы в NGN с помощью системы уровней (рисунок 8.9). Здесь же приведем структуру уровней стека протоколов TCP/IP.

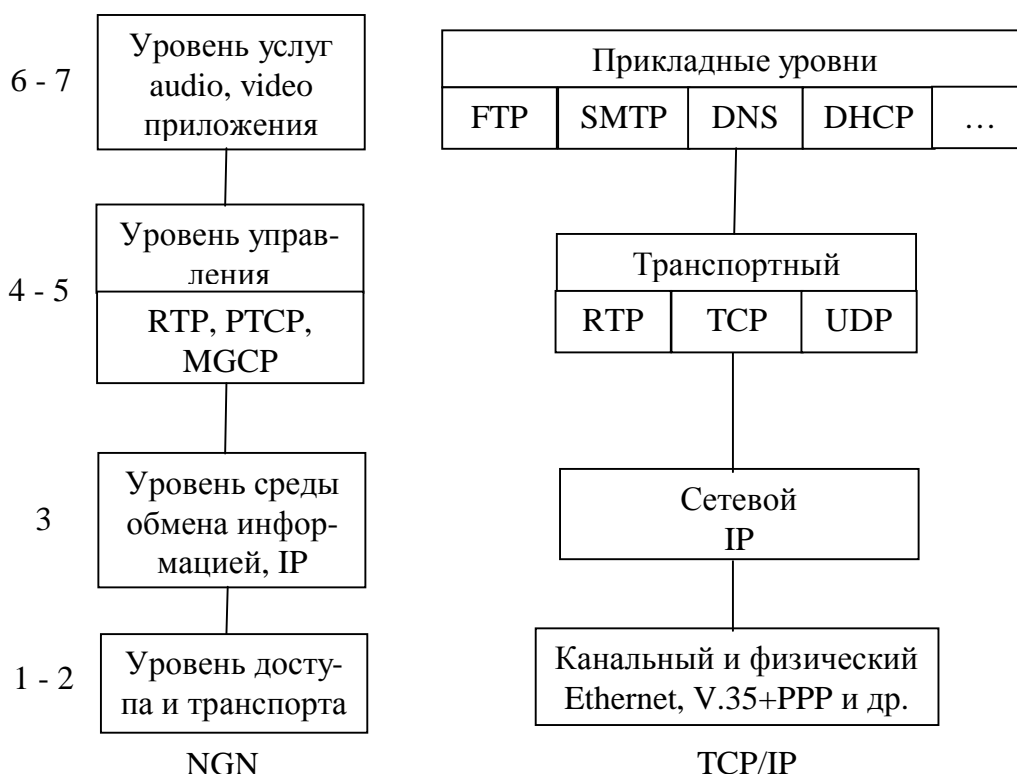


Рисунок 8.9 Структура уровней NGN и TCP/IP

Здесь, как и в NGN, так и в TCP/IP на физическом и канальном уровнях допускаются любые интерфейсы и протоколы. Сетевой уровень обеспечивает передачу пакетов с помощью маршрутных таблиц. На четвертом (транспортном) уровне к известным протоколам гарантированной доставки пакетов (TCP) и негарантированной доставки (UDP) добавляется протокол RTP (Realtime Transport Protocol), обеспечивающий доставку пакетов в реальном масштабе времени. Это необходимо при передаче голосового трафика (IP - телефония) и изменяющегося во времени изображения (телевидение). Основная функция RTP – сглаживание джиттера (изменения задержки сигнала). Как правило, RTP работает совместно с протоколами UDP и RTCP.

Протокол RTCP – предназначен для контроля качества прохождения пакетов (сбор статистики о задержке пакета, джиттере, количестве и доле потерянных пакетов).

На уровне управления NGN помимо RTP введены и другие протоколы. Например, MGCP (Media Gateway Control Protocol) – назначение которого – управление шлюзами со стороны программных коммутаторов.

Для коммутации мультимедийных приложений через IP сети разработаны специальные протоколы H.323, SIP, MGCP, MEGACO и др. Протокол H.323 реализуется в IP – телефонии и кратко рассмотрен в разделе 7.5.2. Напомним, что он осуществляет связь по цепочке:

абонент → медиа – шлюз → IP сеть → программный коммутатор (при-  
вратник) → IP сеть → медиа – шлюз → абонент. Назначение программного  
коммутатора – трансляция адресов, идентификация и авторизация абонент-  
ских терминалов, сбор статистики и тарификация.

В последнее время протокол H.323, который является достаточно  
сложным, заменяется протоколом SIP (Session Initiation Protocol). Он бази-  
руется на протоколе HTTP, работает поверх протокола UDP. Элемент сети  
на базе протокола SIP изображен на рисунке 8.10. Передача информации  
(телефония, данные, видео) осуществляется после установления соедине-  
ния. Для этого абонент А (клиент) обращается с запросом к своему серверу,  
назначение которого принимать и транслировать запросы и возвращать  
ответы. Запрос транслируется на прокси – сервер, который устанавливает  
местоположение абонента В с помощью сервера местопределения и  
транслирует запрос абоненту В через его серверы.

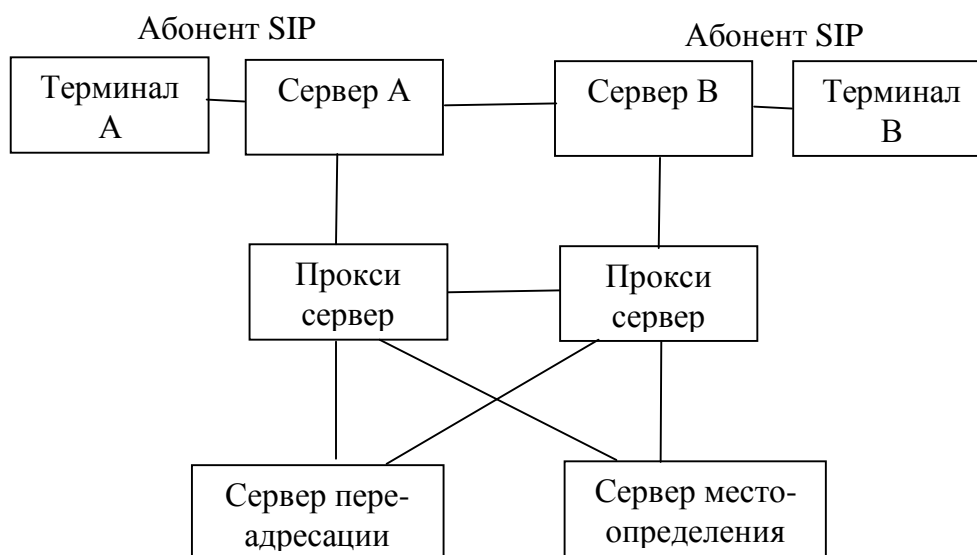


Рисунок 8.10 Элемент SIP – сети

В другом варианте связи местоположение абонента В с помощью сер-  
вера переадресации сообщается непосредственно абоненту А и передача  
информации ведется непосредственно между абонентами, минуя прокси –  
серверы.

Внедрение NGN предполагается эволюционным путем, так как на се-  
тях электросвязи используется много коммутационных станций, работаю-  
щих по технологии коммутации каналов. В сетях доступа также много тер-  
минального оборудования и оборудования узлов, не исчерпавших свой ре-  
сурс. Поэтому один из возможных сценариев перехода к NGN в городских  
телефонных сетях следующий:

1. Вначале создается междугородний узел NGN (IP – телефония). Одно-  
временно функционирует «классическая» АМТС, работающая по тех-

нологии коммутации каналов. Распределение нагрузки между ними осуществляет специальный сервер.

2. На ряде АТС создаются узлы NGN, которые реализуют режим коммутации пакетов. Линии, соединяющие эти узлы, работают по протоколам IP или родственным им протоколам.
3. Технология NGN внедряется на всей сети.

Помимо IP – телефонии перспективными направления NGN являются конвергенция проводной и беспроводной связи, конвергенция телекоммуникаций и информационных технологий.

Список использованной и рекомендуемой литературы.

1. Цифровые и аналоговые системы передачи / В.И.Иванов, В.Н. Гордиенко, Т.Н. Попов и др.- М.: Горячая линия – Телеком, 2003.- 232с.
2. Крук Б.И., Попантонопуло В.Н., Шувалов В.П. Телекоммуникационные системы и сети. Т.1 – Новосибирск.: Сиб. Предприятие «Наука» РАН, 1998. – 536с.
3. Беллами Дж. Цифровая телефония: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986.-544с.
4. Многоканальные системы передачи / Под ред. Боевой Н.Н. и Гордиенко В. Н.- М.: Радио и связь, 1996.- 559с.
5. В.И. Кириллов. Многоканальные системы передачи. – М.: Новое знание, 2002.-751с.
6. Проектирование и техническая эксплуатация систем передачи / Под ред. Гордиенко В. Н. и Крухмалева В.В. –М.: Радио и связь, 1996-344с.
7. Слепов Н.Н. Синхронные цифровые сети SDH. – М.: Эко-Трендз, 2000.-148с.
8. Шмалько А.В. Цифровые сети связи.- М.: Эко-Трендз, 2001. - 283с.
9. Гроднев И.И., Верник С.М. Линии связи. – М.: Радио и связь, 1988.
10. Парфенов Ю.А. Кабели электросвязи. - М.: Эко-Трендз, 2003 – 253с.
11. Иванова О.Н. Автоматическая коммутация. - М.: Радио и связь, 1980.
12. Баркун М.А., Ходасевич О.Р. Цифровые системы синхронной коммутации.- М.: Эко-Трендз, 2001.-187с.
13. Винокуров В.М. Сети связи и системы коммутации. - Томск, ТМЦДО, 2005.
14. Парфенов Ю.А., Мирошников Д.Г. Последняя миля на медных кабелях. - М.: Эко-Трендз, 2001. -221с.
15. Фокин В.Г. Аппаратура и сети доступа.- Новосибирск, Сиб ГУ-ТИ, 1999.-114с.
16. Убайдуллаев Р.Р. Волоконнооптические сети. М.: Эко-Трендз, 2000.-268с.
17. Гольдштейн Б.С., Пинчук А.В., Суховицкий А.Л. IP-телефония. - М.: Радио и связь, 2001.-334с.
18. Иванова Т.И. Корпоративные сети связи. - М.: Эко-Трендз, 2001. -282с.
19. Фокин В.Г. Оптические транспортные сети. - Новосибирск, Сиб ГУТИ, 2003.-157с.

20. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. – Санкт-Петербург, изд-во «Питер»,1999.-668с.
21. Валов С.Г., Голышко А.В. Информационные сети будущего. Вестник связи. №№2-6, 2003.
22. Гургенидзе А.Т., Кореш В.И. Мультисервисные сети и услуги широкополосного доступа. –С-Пб,«Наука и техника», 2003.-400с.
23. Гольдштейн Б.С. Протоколы сети доступа. – М.:»Радио и связь»,2001.-290с.