Некоммерческое акционерное общество

АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ ИМЕНИ ГУМАРБЕКА ДАУКЕЕВА

Кафедра Телекоммуникаций и инновационных технологий

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Учебник
для студентов Образовательной программы
5В071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации

Алматы 2021

УДК 621.37
ББК 32.84
Х42

Рецензенты:
доктор технических наук, профессор университета Туран
И.Т.Утепбергенов,

кандидат физико-математических наук, КазНУ им. Аль-фараби
Н.Т. Изтилеуов

доктор физико-математических наук, профессор АУЭС
Т.Д. Дауменов

Рекомендовано к изданию Ученым советом Алматинского университета энергетики и связи (Протокол №2 от 02.11.2020 г.).

Хизирова М.А., Казиева Г.С.
Х42 Основы построения телекоммуникационных систем: Учебник для студентов высших учебных заведений специальности «Радиотехника, электроника и телекоммуникации.

ISBN 978-601-7939-54-0

В представленном учебнике обобщены, систематизированы и представлены сведения о современных технологиях передачи данных в телекоммуникационных системах. Учебник предназначен для студентов, обучающихся по ОП «Радиотехника, электроника и телекоммуникации».

УДК 621.37
ББК 32.84

ISBN 978-601-7939-54-0

© АУЭС, 2021
Хизирова М.А.,
Казиева Г.С., 2021

Предисловие

Быстрыми темпами развивается элементная база телекоммуникаций. Если традиционные телекоммуникационные сети представляли собой почти исключительно комбинации линейных и нелинейных электрических сетей, то сейчас интенсивно исследуются и внедряются в практику функциональные устройства и системы, производящие обработку сигналов за счет специфических волновых и колебательных явлений в твердых телах — полупроводниках, диэлектриках, магнитных материалах и в воздухе.

Огромную роль в современных телекоммуникационных сетях играют устройства, основанные на микроэлектронной технологии. Доступные, недорогие, надежные и быстродействующие интегральные микросхемы решающим образом изменили облик многих областей телекоммуникационных сетей. Микроэлектроника и вычислительная техника обусловила широкий переход к принципиально новым цифровым способам обработки и преобразования сигналов.

Есть все основания ожидать, что отрасли телекоммуникационных сетей будут и впредь расширяться и развиваться на базе прогресса во многих смежных областях науки. Курс «Основы построения телекоммуникационных систем» в настоящее время занимает одно из центральных мест среди фундаментальных дисциплин, определяющих своим содержанием профессиональную подготовку инженеров по инфокоммуникациям. Следуя за направлением научно-технического прогресса, отражая развитие элементной базы ее теоретического арсенала, этот курс, объединяет и систематизирует наиболее важные принципы в области телекоммуникаций.

Содержание данного учебника соответствует программе курса «Основы телекоммуникационных систем». Предполагается, что читатель, приступивший к изучению книги, прослушал ряд предшествующих курсов, таких как «Введение в специальность», «Высшая математика», «Физика» и «Основы теории цепей».

Работая над текстом, авторы стремились, возможно, теснее сблизить излагаемый материал с практикой учебной работы в вузе. Это в первую очередь определило принцип отбора материала и степень детальности освещения: на страницы книги вынесено лишь «то, что, как показывает практический опыт преподавания, может быть полностью усвоено студентами за отведенное на это время. Учебник содержит целостное представление о существующих сетевых технологиях и архитектуре современных телекоммуникаций, показывает их эволюцию и перспективы развития. Авторы учебника являются практиками, обладающими большим опытом преподавания дисциплины студентам профильных специальностей и направлений подготовки. современными технологиями в области систем и сетей телекоммуникаций;

Структурно в учебнике можно выделить пять взаимосвязанных частей.

Первая часть представляет собой изложение основ построения телекоммуникационных систем и сетей. Даны основные понятия и определения телекоммуникационных и информационных технологий. Представлены понятия сигналов и сообщений.

Во второй части изложено спектральное представление сигналов, рассмотрены основные параметры и характеристики каналов. Даны виды модуляции. В этом же разделе рассмотрена многоканальная телефонная связь и методы разделения каналов в телефонной связи.

В третьей части изложены принципы построения многоканальных систем, рассмотрены основы построения систем передачи с временным разделением каналов (ВРК), показана телекоммуникационная система с частотным разделением каналов. В третьем разделе представлены также методы мультиплексирования и демультиплексирования сигналов, основанные на частотном (FDM), временном разделении, волновое мультиплексирование (WDM), метод случайного доступа CSMA/CD. В этой же главе представлено преобразование аналоговой информации в цифровую форму.

Четвертая часть посвящена дискретизации сигналов, аналого-цифровому преобразованию, цифро-аналоговому преобразованию. В этом же разделе рассмотрены методы коммутации в каналах связи. Представлены разные подходы к выполнению коммутации, рассмотрена пропускная способность сетей с коммутацией пакетов, сетей с коммутацией каналов и с коммутацией сообщений.

Пятая часть рассматривает тенденции объединения цифровых потоков: объединение цифровых потоков в плезиохронной цифровой иерархии, а также объединение цифровых потоков в синхронной цифровой иерархии.

В пятой части также рассматривается обобщенная структурная схема волоконно-оптической системы передачи, классификация ВОСП, особенности передачи электромагнитных колебаний по оптическому кабелю: грозовые разряды, их характеристики.

Освоение дисциплины «Основы построения телекоммуникационных систем» приведет к формированию у обучающихся знаний и умений в области построения сетей общего пользования и локальных сетей; изучение основных характеристик сигналов, их передачи по каналам связи, принципов и особенностей построения аналоговых и цифровых систем передачи и коммутации, используемых для проводной и радиосвязи.

В результате изучения дисциплины у студентов сформируются знания основных принципов построения и функционирования инфокоммуникационных систем и сетей с использованием современных информационных технологий.

В результате освоения дисциплины обучающийся ознакомится с основными характеристиками аналоговых и цифровых сигналов; с аналого-цифровым и цифроаналоговым преобразованием сигналов; четко будет представлять типовые каналы передачи, их основные характеристики.

Основные технические требования, предъявляемые к телекоммуникационным сетям и системам предполагают знание нормативной и правовой документации, характерную для области инфокоммуникационных технологий и систем связи: законы РК, технические регламенты, международные и национальные стандарты, рекомендации МСЭ, стандарты связи, протоколы, терминологию. А также, владение навыками самостоятельной работы на компьютере и в компьютерных сетях; знаниями методов оценки характеристик и показателей эффективности инфокоммуникационных систем; приемами и навыками оценки влияния различных факторов на работу сетей.

Введение

В основу учебника положен материал лекций, которые авторы на протяжении последних лет читали студентам радиотехнического факультета Алматинского университета энергетики и связи (АУЭС). Хочется выразить искреннюю признательность нашим многочисленным ученикам за их интерес к этому курсу и за стремление по-настоящему глубоко освоить фундаментальные принципы современной телекоммуникации.

В этом небольшом по объему учебнике изложен материал по транспортным сетям и сетям управления. Дается подробное описание таких технологий, как SDH, PDH, ВОЛС и MPLS. В качестве примеров приводится построение сетей на их основе. В издании анализируются характеристики первичных электрических сигналов и соответствующих им каналов передачи.

Информация, изложенная в данном учебнике, является хорошим базисом для изучения специальных дисциплин, например таких, как «Многоканальные телекоммуникационные системы», «Спутниковые и радиорелейные системы передачи», «Оптические системы передачи» и др.

Учебник рассчитан на специалистов, которые занимаются техническим и организационным обеспечениям предоставления телекоммуникационных услуг на основе использования ресурсов сетей передачи данных.

Учебник будет полезен также для магистрантов соответствующих специальностей. Данная информация поможет обучающимся овладеть способами проектирования сетей и систем с применением современных сетевых технологий, принципами работы протоколов маршрутизации и управления, способностью использовать нормативную и правовую документацию, стандарты связи, терминологию, документацию по системам качества работы предприятия; применять современные теоретические и экспериментальные методы исследования с целью создания новых перспективных средств электросвязи и информатики, готовностью к организации работ по практическому использованию и внедрению результатов исследований; понимать сущность основных экономических и финансовых показателей деятельности организации связи, особенности услуг как специфического рыночного продукта; организовать бизнес-процессы предоставления инфокоммуникационных услуг пользователям, нацеленные на наиболее эффективное использование ограниченных производственных ресурсов; обеспечивать эффективной и добросовестной конкуренции на рынке услуг связи.

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих качеств: владению культурой мышления, способностью к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей её достижения, умению логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь.

Изложенная в учебнике информация является теоретической и практической подготовкой студентов, которая обеспечит углубленные

представления о современных сетевых технологиях высокоскоростной передачи данных в инфокоммуникационных системах (ИС) и сервисах. способах их реализации и применения.

Информация, изложенная в данном учебном материале в системе подготовки бакалавра и с учетом его последующей профессиональной деятельности является необходимой при, изучении основ различных высокоскоростных современных сетевых технологий и их применения в ИС и сервисах; спецификаций физического уровня модели OSI, реализаций последней мили и 100 Base/1000-Base/10GbE Ethernet, применения высокоскоростных технологий для реализации сервисов городских сетей и центров хранения данных (ЦОД), предотвращения отказов, диагностики и повышения производительности инфокоммуникационной системы с целью наиболее полного удовлетворения потребностей населения в услугах передачи данных, а также развития новых сервисов телекоммуникационных компаний.

В результате изучения материала, изложенного в данном учебнике студенты могут получить знания, имеющие самостоятельное значение, необходимые для изучения других профессиональных дисциплин и обеспечивающие написание выпускной квалификационной работы, осваивает основные протоколы и стандарты высокоскоростных сетевых технологий, нормативную и правовую документацию, терминологию, способы кодирования и мультиплексирования данных в современных сетевых технологиях, основы реализации современных сред передачи данных, высокоскоростные методы доступа в канал и методы коммутации, способы связи сегментов сетей, способы реализации последней мили; знакомится со способами и средствами монтажа, наладки и настройки сетевых средств, проверки их работоспособности и сдачи в эксплуатацию, знакомится с методами моделирования процессов в инфокоммуникационных системах с использованием специализированных пакетов системных и прикладных программ, с методами управления и эмуляции сетевых устройств; смогут проводить расчеты технических метрик высокоскоростных технологий с использованием стандартных методов и с применением самостоятельно создаваемых оригинальных методик, контролировать соответствие разрабатываемых функциональных схем и технической документации стандартам и другим нормативным документам;

- изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт в области инфокоммуникционных технологий и организовывать работы по практическому использованию новых технологий.

1 Принципы построения телекоммуникационных систем и сетей

1.1 Основы построения телекоммуникационных систем и сетей Основные понятия и определения телекоммуникационных и информационных технологий. Сообщения и сигналы

Подчеркивая неразрывную связь информационных и телекоммуникационных компонентов в формировании сетевых услуг на основе мультисервисной платформы, в технической литературе используются такие интегрирующие понятия, как «инфокоммуникации», «инфокоммуникационная сеть». Быстро развивающиеся телекоммуникационные и информационные технологии, опережая друг друга, постоянно меняют идеологию построения сетей связи, порождая все новые и новые сетевые концепции. Несмотря на все их многообразие изучение и исследование сетей, как показывает опыт, целесообразно все же осуществлять в двух аспектах: телекоммуникационные сети и информационные сети.

Понятие «телекоммуникации» базируется на представлении о средствах, позволяющих организовать связь между двумя и более территориально удаленными пунктами.

Сектор по стандартизации телекоммуникаций Международного Союза Электросвязи (Telecommunications Standartization Sector of International Telecommunications Union, ITU-T) в Рекомендациях I.110, 112 определяет термин «телекоммуникация» (Telecommunication) как совокупность средств, обеспечивающих перенос информации, представленной в требуемой форме, на значительное расстояние посредством распространения сигналов в одной из сред (меди, оптическом волокне, эфире) или совокупности сред. К указанным средствам, определяемым общим понятием «средства телекоммуникаций», как правило, относят:

– линии связи;

– линейную аппаратуру (устройства сопряжения сред, системы передачи);

– коммуникационные устройства (устройства перераспределения потоков информации в точках пересечения нескольких линий связи);

– оборудование, обеспечивающее функции сигнализации и синхронизации.

Основываясь на этих понятиях, телекоммуникационная сеть (Telecommunication Network) – это совокупность телекоммуникаций, посредством которых обеспечивается информационный обмен между множеством территориально удаленных объектов. В качестве удаленных объектов при этом могут выступать как оконечные системы сети, так и отдельные локальные и территориальные сети (рисунок 1.1).

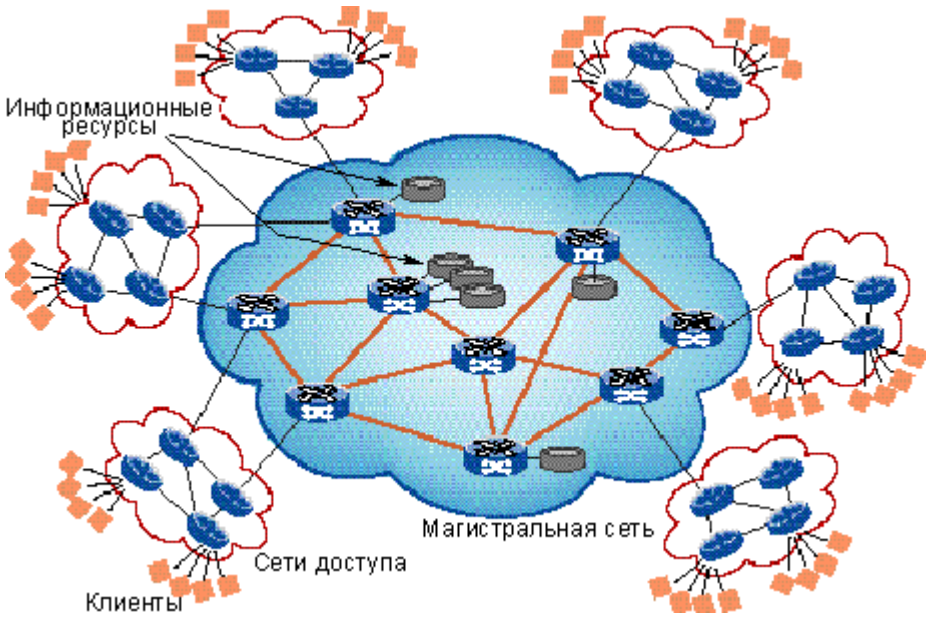


Рисунок 1.1 - Телекоммуникационная сеть

Качество обслуживания определяется совокупностью показателей (таких как скорость передачи информации, полоса пропускания сигналов, вероятность ошибок и т. п.), определяющих степень соответствия телекоммуникационной сети нормам эксплуатации и требованиям пользователей.

Оконечной точкой телекоммуникационной сети выступает либо телекоммуникационный разъем (так называемый сетевой интерфейс), к которому подключается устройство пользователя, либо оконечное сетевое оборудование (межсетевой интерфейс), обеспечивающее сопряжение сетей.

Основной задачей телекоммуникационной сети является предоставление качественного транспортного переноса информации в пространстве, а именно: требуемой среды передачи, заданной ширины полосы пропускания, качества передачи сигналов, скорости передачи и т.п. В англоязычной литературе, подчеркивая именно этот аспект, телекоммуникационную сеть называют Carrier Network (сеть-переносчик).

Телекоммуникационная сеть - это комплекс технических средств телекоммуникаций и сооружений, предназначенных для маршрутизации, коммутации, передачи и / или прием знаков, сигналов, письменного текста, изображений и звуков или сообщений любого рода по радио, проводным, оптическим или другим электромагнитным системам между оконечным оборудованием

Сеть связи первичная [ПС] - совокупность типовых физических цепей, типовых каналов передачи и сетевых трактов, образованная на базе сетевых узлов, сетевых станций, оконечных устройств первичной сети и соединяющих их линий передачи. Часть сети, ограниченная территорией сельского района или города, называется местной первичной сетью. Часть, охватывающая территорию зоны и обеспечивающая соединение между собой каналов разных

местных сетей внутри этой зоны, образует внутризоновую первичную сеть. Часть сети, соединяющая между собой каналы разных зоновых сетей на всей территории страны, составляет магистральную первичную сеть. Принцип построения первичной сети ВСС показан на рисунке 1.2. В состав ПС входят сетевые узлы, сетевые станции и линии передачи 1.2.

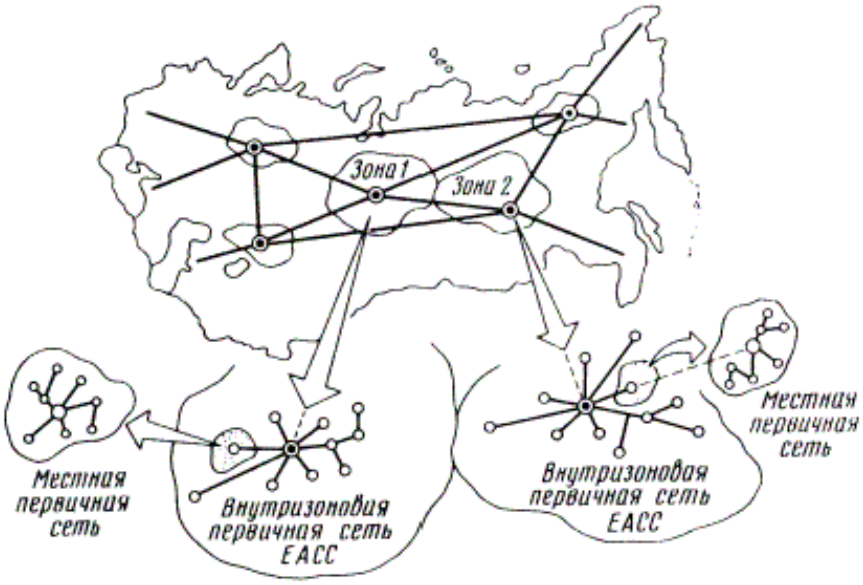


Рисунок 1.2 - Принцип построения первичной сети

Узел сетевой - комплекс технических средств, обеспечивающий соединение сетевых станций первичной сети, образование и перераспределение сетевых трактов, типовых каналов передачи и типовых физических цепей, а также представление их вторичным сетям и спецпотребителям.

Станция сетевая - комплекс технических средств, обеспечивающий образование и предоставление вторичным сетям типовых физических цепей, типовых каналов передачи и сетевых трактов, а также их транзит.

Для организации взаимодействия между магистральными узлами и станциями строятся транспортные сети.

Сеть транспортная - часть первичной сети связи, охватывающая магистральные узлы, междугородные станции, а также соединяющие их каналы и узлы (национальные, международные).

Канал передачи - комплекс технических средств и среды распространения, обеспечивающий передачу сигнала электросвязи в определенной полосе частот или с определенной скоростью передачи между сетевыми станциями, сетевыми узлами или между сетевой станцией и сетевым узлом, а также между сетевой станцией или сетевым узлом и оконечным устройством первичной сети. Каналы подразделяются на аналоговые, цифровые и смешанные (аналого-цифровые).

Канал передачи, параметры которого соответствуют принятым нормам, называют типовым. Например, это каналы: тональной частоты с полосой частот 300…3400 Гц или основной цифровой канал (ОЦК) со скоростью передачи 64 кбит/с.

Канал передачи, групповые тракты организуются с помощью соответствующих систем передачи.

Система передачи - комплекс технических средств, обеспечивающих образование линейного тракта, типовых групповых трактов и каналов передачи первичной сети. Системы передачи разделяют на аналоговые и цифровые, проводные (электрические и оптические) и радиорелейные.

Групповой тракт - комплекс технических средств, предназначенный для организации нормализованного числа каналов тональной частоты или ОЦК в полосе частот или со скоростью передачи, соответствующей данному групповому тракту.

Групповой тракт, параметры и структура которого соответствуют принятым нормам, называют типовым. Например, это первичный аналоговый тракт с полосой частот 60…108 кГц или первичный цифровой тракт со скоростью передачи 2048 кбит/с.

Линейный тракт системы передачи - комплекс технических средств, обеспечивающий передачу сигналов электросвязи в полосе частот или со скоростью, соответствующей данной системе передачи. Линейный тракт может быть радиорелейным, кабельным (оптическим или электрическим), по типу системы передачи - аналоговым или цифровым.

1.2 Структура ПС сети

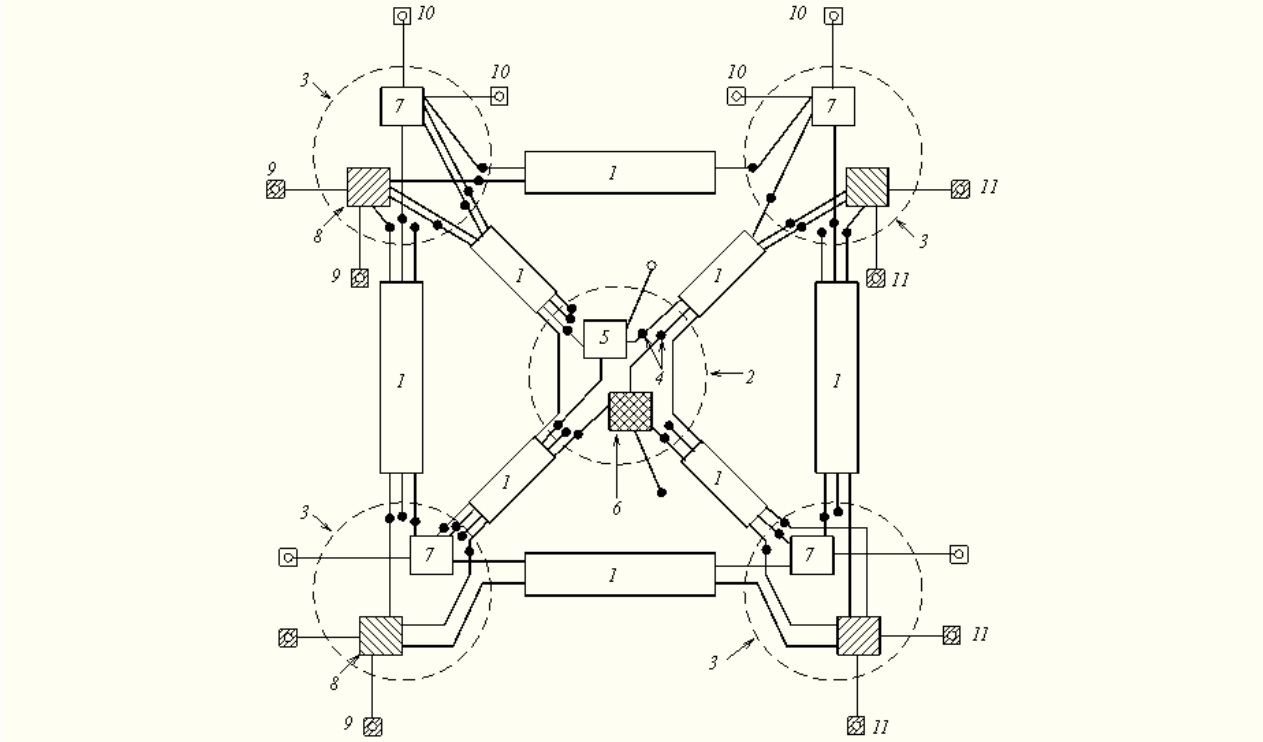
Структура ПС учитывает административное деление страны. Территория страны поделена на зоны. Признак зоны - единая семизначная нумерация. Как правило, зоны совпадают с территориями областей. В соответствии с этим делением ПС состоит из отдельных частей (рисунок 1.2):

- местные ПС (МСП) - ограничены территорией города или сельского района;
- внутризоновые ПС (ВЗПС) - охватывает территорию зоны и обеспечивает соединение местных сетей внутри зоны;
- магистральная ПС (СМП) - соединяет зоновые сети.

На базе первичной сети строятся вторичные сети связи (ВС).

Сеть связи вторичная - совокупность линий и каналов вторичной сети, образованных на базе первичной сети, станций и узлов коммутации или станций и узлов переключений, предназначенная для организации связи между двумя, или более, определёнными точками. Границами вторичной сети являются стыки этой сети с абонентскими оконечными устройствами.

В состав ВС входят: оконечные абонентские устройства, абонентские линии (АЛ), коммутационные устройства и каналы, выделенные из ПС для организации данной ВС (рисунок 1.3).



1 - система передачи (транспортная система); 2 - сетевой узел первичной (транспортной) сети; 3 - сетевая станция; 4 - интерфейсы - граница между двумя взаимодействующими системами (устройствами), определяемая общими функциональными и конструктивными характеристиками, требованиями к протоколам обмена и т.д. 5 - узел вторичной сети А - комплекс технических средств, осуществляющих соединение вторичной сети между собой; 6 - узел вторичной сети Б; 7 - станция вторичной сети А - комплекс технических средств, обеспечивающий соединение линий и каналов вторичной сети; 8 - станция вторичной сети Б; 9 - абонентский терминал сети А; 10 - абонентский терминал сети Б; 11 - линия передачи абонентская.

Рисунок 1.3 - Взаимодействие первичной и вторичных сетей ВСС

Устройство оконечное абонентское (абонентский терминал) - оконечное устройство, устанавливаемое в помещении абонента и находящееся в его пользовании. В абонентский терминал могут включаться элементы сети (сетевые окончания) и операционные системы.

В зависимости от вида электросвязи вторичная сеть ВСС имеет название: телефонная, передача данных, звукового вещания, телевизионного вещания.

В зависимости от принадлежности сети связи подразделяются на:

1) Сеть связи общего пользования - составная часть ВСС РК, открытая для пользования всем физическим и юридическим лицам.

2) Сети связи ведомственные (корпоративные) - сети электросвязи министерств и иных федеральных органов исполнительной власти, промышленных объединений (Газпром, Энергетические системы) и предприятий, создаваемые для удовлетворения производственных и специальных нужд, в масштабе как одного, так и нескольких государств,

имеющие выход на сеть связи общего пользования. Корпоративные строятся так же, как и сети связи общего пользования. Они состоят из первичных и вторичных сетей.

3) Сеть связи наложенная - сетевая структура, которая строится параллельно существующей сети, как правило, с использованием новых методов передачи и коммутации (например, цифровых) и сопрягается с существующей сетью на различных иерархических уровнях.

1.3 Классификация сетей по масштабно-территориальному признаку

Классификация сетей по масштабно-территориальному признаку может быть представлена следующей иерархией.

Локальная сеть LAN (Local Area Network) – сеть, в которой основная часть трафика замыкается внутри небольшой территории, учреждения, промышленного предприятия и т. п. К сетям типа LAN могут быть также отнесены сети, образованные как совокупность нескольких локальных сетей, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга. Кабельная система совместно с коммуникационным оборудованием в такой сети может рассматриваться как локальная телекоммуникационная сеть.

Сеть мегаполиса MAN (Metropolitan Area Network, METRO) – сеть, охватывающая территорию города, сельского района либо небольшого региона.

Крупномасштабная территориальная сеть WAN (Wide Area Network) – сеть, предназначенная для объединения сетей типа LAN, MAN и прочих сегментов, расположенных на территории большого региона, государства, континента, а также на различных континентах.

Глобальная сеть GAN (Global Area Network) – общепланетарная сеть, объединяющая все государства и континенты и обеспечивающая доступ к информационным ресурсам в любой точке земного шара.

Классификация сетей по масштабно-территориальному признаку представляет интерес, поскольку применяемые в них технологии в значительной степени отличаются друг от друга. Принимая во внимание различия технологий локальных и глобальных сетей нетрудно понять, почему до недавнего времени существовали различные классы специалистов, занимающихся сетями соответствующих масштабов. В условиях наметившейся тенденции к сближению локальных и глобальных сетей, а также конвергенции используемых в них технологий ситуация несколько изменилась.

Специалисты в области локальных сетей столкнулись с необходимостью объединения нескольких локальных сетей, расположенных в разных географических районах. Это в свою очередь повлекло за собой необходимость в расширении области их специализации до уровня глобальных телекоммуникаций. В свою очередь, специалисты по глобальным

сетям, стремясь расширить набор и качество предоставляемых услуг, повысить пропускную способность и скорость передачи данных, невольно сосредотачивали свое внимание на достижениях в технологиях локальных сетей.

Специалист уровня сетевого интегратора – это специалист новой формации, который обязан решать задачи различного уровня, начиная от создания локальных сетей и обеспечения им выхода в глобальное информационное пространство и заканчивая объединением сетей предприятий, расположенных на разных континентах, используя при этом глобальные сети и обеспечивая необходимые требования по защите информации.

1.4 Классификация по принципу декомпозиции

Международный Союз Электросвязи определяет термин «транспортирование» как процесс переноса информации в пространстве между территориально разнесенными пунктами. При этом контролируются такие сетевые функции как качество обслуживания из конца в конец, управление потоками с целью предотвращения перегрузок в сети и т.п. Термин «транспортирование» следует отличать от термина «передача», под которым понимается процесс распределения сигнала в физической среде между двумя смежными пунктами сети. Транспортную функцию в информационной сети, как уже отмечалось, выполняет телекоммуникационная сеть. Степень сетевой активности при транспортировке информации различными ее участками определяется соответствующими интенсивностями сетевого трафика.

Под трафиком понимается совокупность потоков пользовательской и служебной информации, создающих нагрузку на телекоммуникационную сеть в единицу времени или на протяжении определенного временного интервала.

Различная степень интенсивности трафика и характер его распределения в разных участках телекоммуникационной сети могут быть положены в основу декомпозиции транспортной функции. Декомпозиция предусматривает выделение трех типов сегментов, решающих относительно самостоятельные функциональные подзадачи, а именно: транспортные сети, сети доступа и распределительные сети.

Транспортная сеть (Transport Network, Transmission Media) – это инфраструктура, характеризующаяся высокой степенью концентрации трафика, посредством которой осуществляется информационный обмен между сегментами с более медленным трафиком. Термин «транспортная сеть», на наш взгляд, больше отражает технологические особенности реализации высокоскоростной передачи сигналов в территориальных и глобальных сетях. Различают три поколения транспортных технологий территориальных сетей:

– плезиохронная цифровая иерархия (PDH);

– синхронная цифровая иерархия (SDH);
– уплотненное волновое мультиплексирование (DWDM).

Первые две технологии поддерживают иерархии скоростей, так что можно выбрать любую подходящую скорость передачи цифровых потоков при организации информационного обмена между подключенными медленными сегментами. Технология DWDM представляет собой более современное достижение в области создания высокоскоростных каналов. Они предоставляют для передачи информации выделенную волну.

Территориальные транспортные сети некоторые авторы называют «первичными сетями». Под первичными сетями традиционно понимались сети, предоставляющие выделенные каналы для двухточечных соединений пунктов наложенных сетей. Последние, в свою очередь, получили название «вторичные». В качестве вторичных в свое время создавались телефонные сети, компьютерные сети, сети кабельного телевидения и т.п.

С понятием «транспорт» часто ассоциируется любая магистральная сеть, имеющая топологию кольца либо цепи, так называемая транспортная магистраль. Транспортная магистраль может быть организована на любом из уровней (LAN, MAN, WAN) с использованием соответствующих этому уровню технологий.

Сетью доступа (Access Network) в общем случае называется сегмент телекоммуникационной сети, в котором формируются информационные потоки, направляемые в транспортную сеть.

Сопряжение сетей доступа с транспортной сетью осуществляется в узлах доступа. Сети доступа в общем случае разделяются на:
– сети проводного доступа;
– стационарные сети беспроводного доступа;
– сети мобильного доступа.

Сеть доступа оканчивается с одной стороны устройством, которое называется сетевым окончанием (NT – Network Terminal) или устройством сетевого окончания (NTU – Network Termination Unit) а с другой – интерфейсом узла доступа (ANI – Access Node Interface). Участок сети между сетевым окончанием, к которому подключает терминальное устройство пользователя и интерфейсом узла доступа, определяется термином «сеть абонентского доступа». Например, участок между абонентской розеткой и входным интерфейсным устройством местной телефонной станцией. Хотя сети доступа и транспортные сети совместно решают общую задачу – реализацию транспортной функции по переносу информации из конца в конец, используемые в них телекоммуникационные технологии существенно отличаются.

Распределительной сетью (Distribution Network) называют сегмент телекоммуникационной сети, посредством которого концентрированный поток, поступающий из транспортной сети, перераспределяется и доводится до потребителей. Классическим примером такой сети может служить сеть оператора кабельного телевидения (рисунок 1.5).

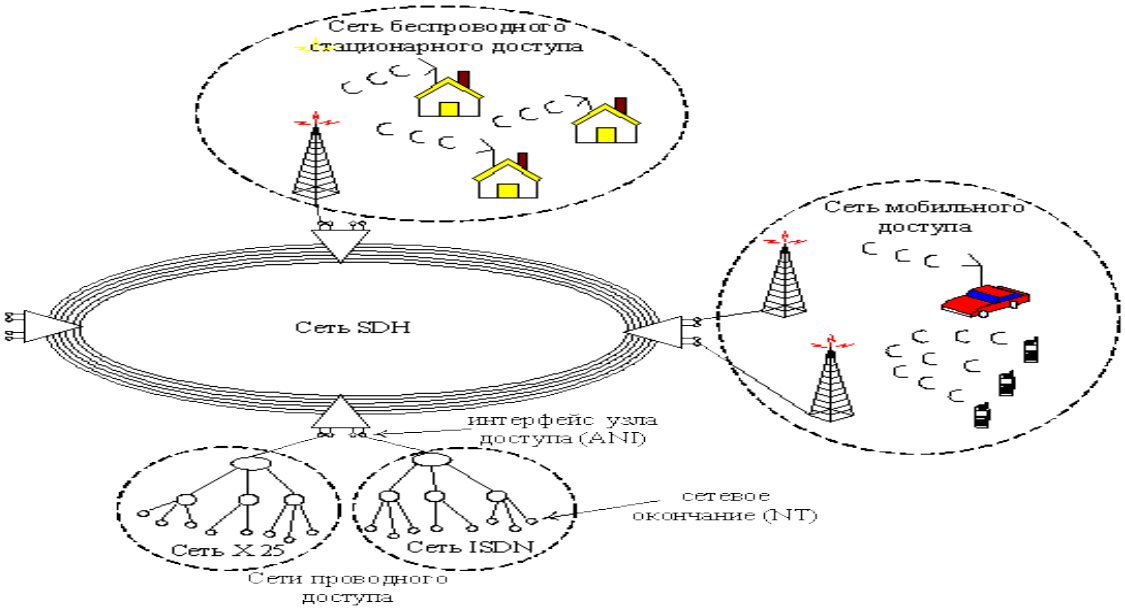


Рисунок 1.5 - Транспортная сеть и сети доступа

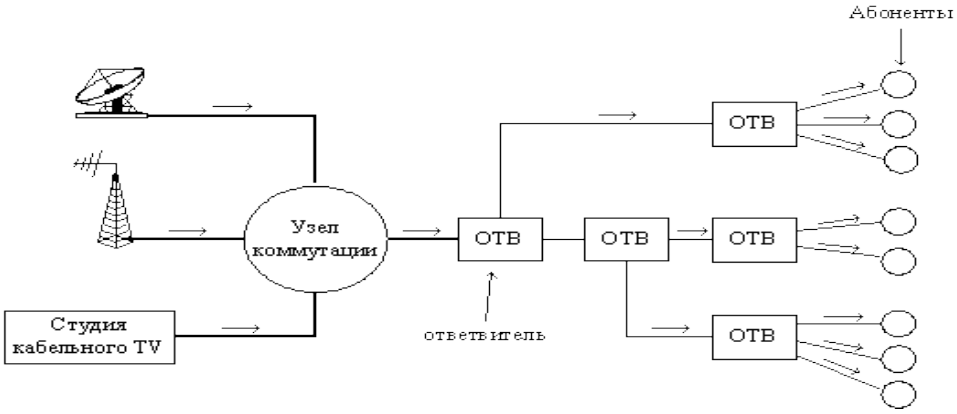


Рисунок 1.6 - Распределительная сеть

1.5 Принцип передачи сообщений, информации, сигналов

1.5.1 Информация, сообщения, сигналы.

Информация - это сведения, являющиеся объектом передачи, распределения, преобразования, хранения или непосредственного использования. Сообщение является формой представления информации.

Количество информации в отдельно взятом сообщении определяется величиной, обратной вероятности появления сообщения, вычисленной в логарифмических единицах:

$$J(a) = \log_k \cdot \frac{1}{p(a)} = -\log_k p(a), \qquad (1.1)$$

где $p(a)$ - вероятность сообщения a;

k - основание логарифма.

При $p(a)=1$ количество информации равно нулю, то есть сообщение об известном событии никакой информации не несет.

Основание логарифма чаще всего принимают равным двум $k=2$, и тогда количество информации, содержащейся в сообщении, выражается в двоичных единицах. Двоичную единицу обычно называют битом - от binary digit (двоичная цифра). Совокупность всех возможных сообщений и вероятностей их появления образует ансамбль сообщений. Если ансамбль состоит всего из двух сообщений a_1 и a_2 (например, вида «да» и «нет» или 0 и 1), которые являются независимыми и равновероятными, то есть $p(a_1)= p(a_2) =1/2$, то каждое из сообщений несет одну двоичную единицу (один бит) информации: Принцип передачи сообщений представлен на рисунке 1.7.

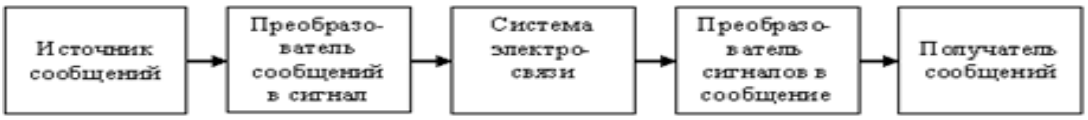


Рисунок 1.7 - Принцип передачи сообщений

Система электрической связи – это совокупность технических средств и среды распространения сигналов, обеспечивающих передачу сообщений от источника к получателю.

Характеризуя систему связи, используют понятия: информация, сообщение, сигнал. Эти понятия имеют много общего и часто используются как синонимы, однако это не всегда правильно.

Информация – новые сведения об окружающем нас мире, в результате взаимодействия с ним (сведения о каком-либо явлении, событии или состоянии объекта). Принято выделять следующие виды информации: личную; специальную; массовую. Информация может быть объектом хранения, передачи, преобразования. Схема передачи информации представлена на рисунке 1.8.

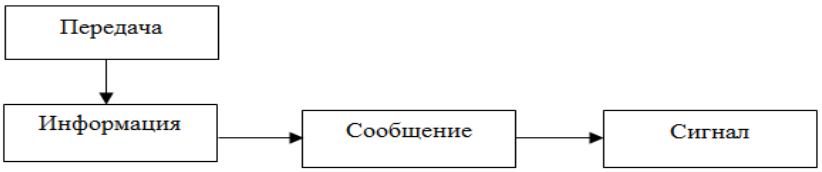


Рисунок 1.8 - Схема передачи информации

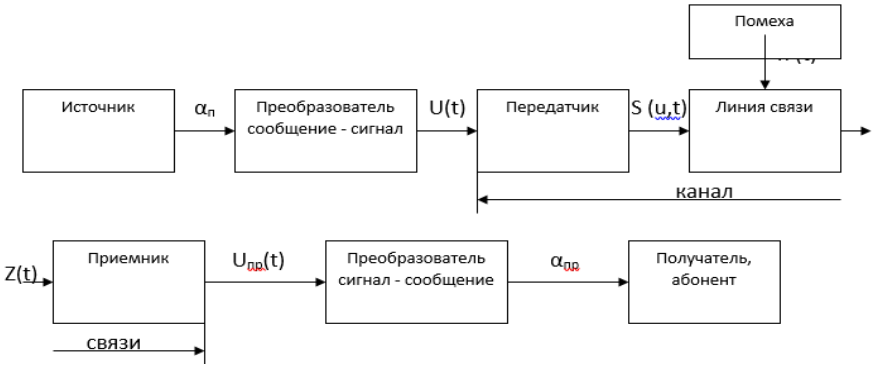
Сообщение – форма представления информации (устное, письменное, телеграфное, телевизионное и др.; сообщение может быть непрерывным и дискретными.

Сигнал – процесс изменения во времени физического состояния какого-либо объекта, служащий для отображения, регистрации и передачи сообщения.

Сигнал – это материальный носитель сообщения (электрический, электромагнитный, механический, оптический, звуковой).

Прием информации осуществляется в обратном порядке.

Упрощенная структурная схема системы связи приведена на рисунке 1.9.



$a_П$ – первичное сообщение; $U(t)$ – первичный сигнал; $S(u,t)$ – модулированный сигнал; $n(t)$ – помеха; $Z(t)$ – сигнал плюс помеха; $U_{ПР}(t)$ – принятый первичный канал; $a_{ПР}$ – принятое сообщение.

Рисунок 1.9 - Структурная схема системы связи

Дискретные сообщения, формируемые источником, представляют собой последовательность знаков (например, текст набирается из букв и символов, алфавит первичный).

Для передачи сообщения производится кодирование, чаще всего в двоичной системе. Символы, с помощью которых отображаются знаки сообщения, называется вторичным алфавитом или основанием кода.

Реальный сигнал является функцией времени и носит случайный характер. Все сигналы делятся на:

1) Детермированные сигналы.

2) Случайные.

Детерминированный сигнал - любой сигнал, параметры и мгновенное значение в момент времени могут быть предсказаны с вероятностью единица.

Случайные сигналы - функции времени, значение заранее неизвестный могут быть предсказаны лишь с некоторой вероятностью, меньшей единицы.

$$S(t) = A_0 \cdot \cos(w_0 t + Y_0) \quad . \qquad (1.2)$$

Сигналы известной формы являются испытательными.

Детерминированные сигналы представляют собой известную функцию времени (т.е. можно подбирать для них соответствующие математические выражения).

Случайным называется такой сигнал, мгновенное значение которого носит случайный характер.

Наиболее полной характеристикой случайных сигналов (процессов) является их n -мерный закон распределения.

Чем больше n тем точнее сведения о поведении случайного сигнала (процесса), т.е. n —> ∞.

Параметры сигнала:

1) T_c - длительность сигнала;

2) $Д_c$ - динамический диапазон сигнала.

$$D_c = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}; \ g, h = \frac{U_{с.ном}}{U_{помехи}} = \frac{P_c}{P_{помехи}}.$$

Чем больше g, тем больше вероятность правильного приема.

3) F_c - ширина спектра сигнала, связанных со скоростью изменения сигнала (скорость изменения функции). Большая скорость изменения, следовательно, спектр широкий, меньше скорость изменения - спектр узкий.

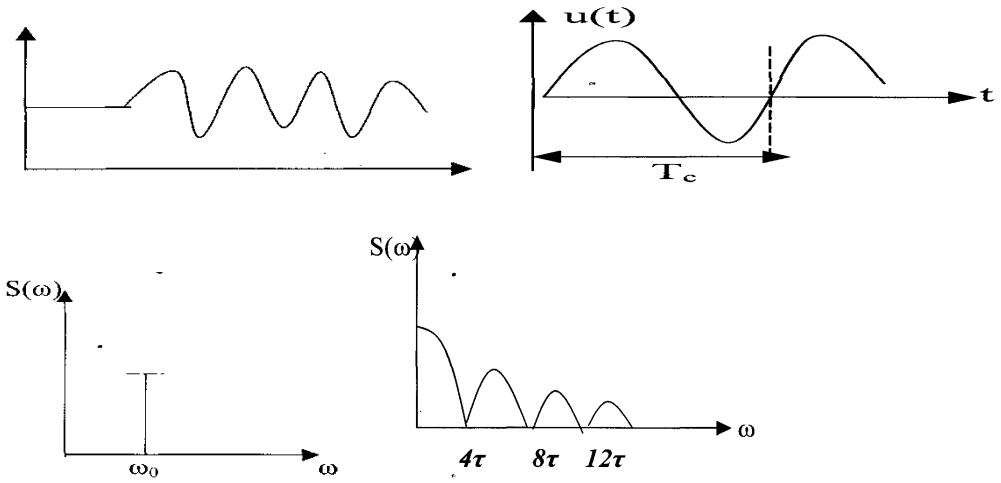


Рисунок 1.10 – Временные и частотные характеристики сигнала, где τ - время задержки

Если τ увеличивается – спектр стягивается.

Если τ уменьшается – спектр расширяется, амплитуда уменьшается.

Любой сигнал, имеющий форму, отличную от гармонического (cos, sin) является сложным, следовательно, его можно разложить на отдельные составляющие $T_c; Д_c; F_c$ которого нозовем объемом сигнала:

$$T_c \cdot Д_c \cdot F_c = V_c$$

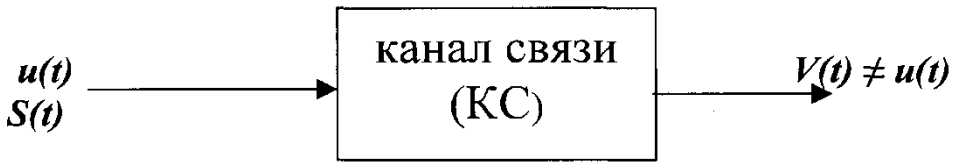


Рисунок 1.11 - Прохождение сигнала через КС

При прохождении через КС сигнал искажается.

Параметры канала:

1) $T_k > T_c$ (T_k время безотказной работы канала).

2) $Д_k > Д_c$ ($Д_к$ - динамический диапазон канала).

3) F_R - ширина полосы пропускания канала.

Пропускаются те спектральные составляющие, которые попадают в F_k.

F_k - должно быть таким, чтобы пропускались все спектральные составляющие.

$T_k \cdot Д_k \cdot F_k = V_K$ - объем канала связи.

$V_k \geq V_c$ - достаточное условие для передачи сигнала через КС.

Один параметр можно заменить на другой, не изменяя объема.

Основные свойства КС:

1) Все КС можно рассмотреть как линейную систему, т.е. к каналу связи применим принцип суперпозиции (то, что подаем на вход, то получаем на выходе).

2) Во всех КС даже при отсутствии полезного сигнала, существует помеха, т.е. канала без помехи не существует.

S -сигнал;

W -помеха.

3) При прохождении через КС сигнал задерживается на некоторое время τ и его уровень изменяется μ раз.

$X(t) = \mu \cdot S(t-\tau) + W(t)$ - на выходе.

Если μ и τ не постоянны, то такой канал называется каналом с переменными параметрами.

Если на вход приемника сигнал поступает несколькими способами, то такой канал называется многолучевой канал.

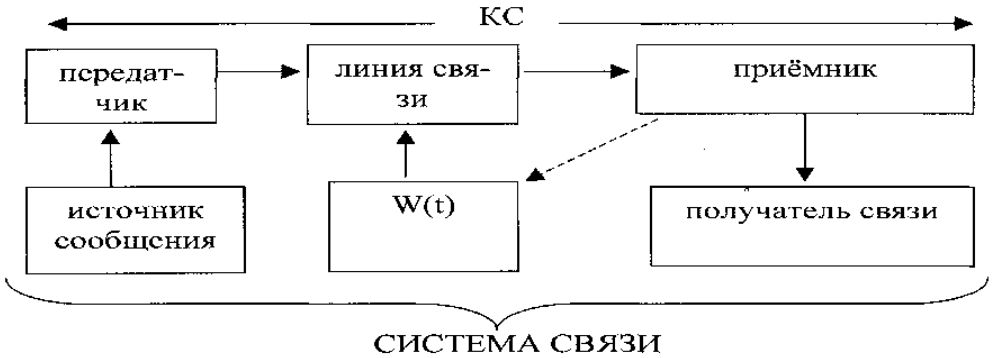


Рисунок 1.12 - Система связи

Линия связи - физическая среда, при помощи которой соединяется вход приемника с выходом передачи, или наоборот.

Многоканальной - называется такая система связи (СС), которая обеспечивает передачу сообщений от $n^{го}$ количества источников к $n^{му}$ количеству получателей без взаимного влияния.

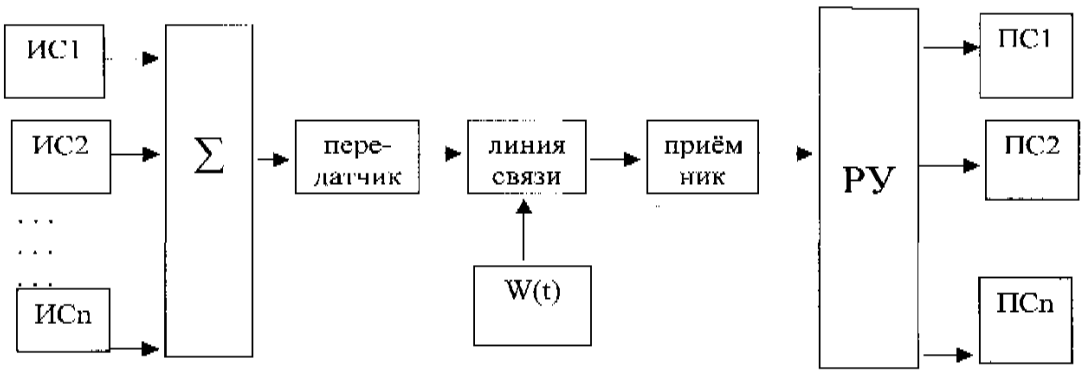


Рисунок 1.13 - Многоканальная система связи

1.5.2 Искажения и помехи.

При прохождении через КС сигнал $U(t)$ искажается и $U(t) \neq V(t)$

Искажения разделяют на два типа: линейные; нелинейные.

Линейные искажения (ЛИ)- появляются за счет неравномерности АЧХ и ФЧХ КС или УС.

Нелинейные искажения (НИ) - происходят за счет нелинейности АЧХ КС.

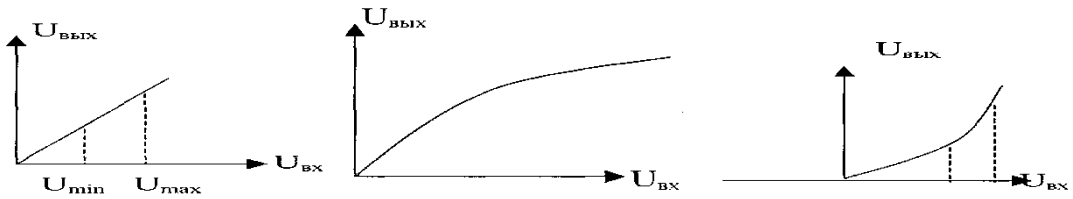


Рисунок 1.14 - Линейные искажения и нелинейные искажения

$K_{kc} = U_{вых} / U_{вх} = const$ - коэффициент усиления:

$$K_{нл} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + ... + U_n^2}}{U_1} \cdot 100\%; \quad (1.3)$$

$$K_{г2} = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\%; \quad (1.4)$$

$$K_{г3} = \frac{U_3}{U_1} \cdot 100\%. \quad (1.5)$$

Помехи делятся на внешние и внутренние. К внешним помехам относятся: грозовые разряды, работа сварочного аппарата. электрический транспорт, радиоэлектронная медицинская аппаратура. К Внутренним помехам относятся собственные шумы, шумы элементов устройства.

Все эти помехи в зависимости от воздействия на полезный сигнал $S(t)$, $U(t)$ разделяют на две группы:

1) Аддитивная помеха - это помеха которая суммируется с полезным сигналом $S(t) + W(t) = X(t)$ - аддитивная помеха.

2) Мультипликативная помеха $X(t) = \mu(t) \cdot S(t)$, где $\mu(t)$ - влияние помехи на уровень полезного сигнала. Аддитивная помеха может быть флуктуационной, импульсной(помеха, сосредоточенная во времени), квазигармоническая (помеха, сосредоточенная по частоте).

Любой сигнал отличный от гармонического можно считать сложным.

В технике связи используются импульсные сигналы, к классическим можно отнести видеоимпульс и радиоимпульс.

Как видно из рисунков, радиоимпульс образован из видеоимпульса, его математическую модель можно представить в виде:

$$U_p(t) = U_в(t) \cdot \cos(\omega t + \psi_0) \quad (1.6)$$

где $U_в(t)$ – изгибающий;

$\cos(\omega t + \psi_0)$ - дополнительность.

В электросвязи, чаще всего применяют одиночные импульсы или их периодическую последовательность прямоугольной формы.

Для периодической последовательности импульсов введено понятие скважности, отношение периода к длительности импульса:

$$S = T / t_и \quad . \quad (1.7)$$

Для анализа и испытаний радиотехнических цепей используется δ-функция, которая является математической моделью прямоугольного импульса малой длительности и большой амплитуды:

$$\delta(t-t_0). \tag{1.8}$$

Сложные сигналы, к которым, в первую очередь можно отнести отрезок речевого сигнала, трудно выразить простыми математическими методами. Поэтому, такой сигнал представляется в виде ряда простых функций (базисных) $\psi_k(t)$:

$$X(t)=\sum_{k=0}^{\infty} f_k \cdot \psi_k(t) \ , \tag{1.9}$$

где f_k - коэффициенты разложения рядов, зависящие от сигнала $X(t)$.

Учитывая, что есть помехи имеют такую же физическую природу, как и сигналы, то все выше приведенные рассуждения относятся и к ним.

1.5.3 Кодирование и декодирование.

Процесс перехода от первичного сообщения к его вторичному отображению называется кодированием.

Кодирование - закон построения сигнала. В результате кодирования дискретные элементы сообщения заменяются совокупностью элементарных сигналов. Обычно в качестве элементарных сигналов используют 0 и 1. Различимые элементы, из которых состоит кодовая комбинация, называется основанием кода. Если основание n больше двух, то это многопозиционный код. Если основание n равно 2, то это двухпозиционный код.

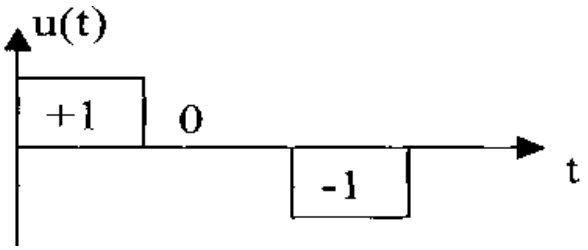


Рисунок 1.15 -Трёхпозиционный код

Совокупность элементарных сигналов, соответствующая одному дискретному элементу сообщения, называется кодовой комбинацией.

Совокупность кодов комбинаций, соответствующих совокупности дискретных элементов сообщения, называется кодом.

Количество элементарных сигналов, из которых состоит кодовая комбинация, характеризует длительность кодовой комбинации и называется значимостью кода. Коды существуют равномерные и неравномерные.

Равномерным - называется такой код, кодовая комбинация которого состоит из одинакового количества элементарных сигналов.

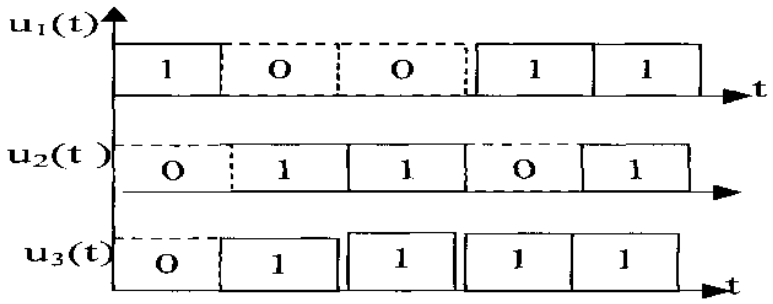


Рисунок 1.16 - Кодовые комбинации равномерного двоичного кода

Неравномерный код - код, кодовые комбинации которого состоят из различного количества элементарных сигналов. По помехоустойчивости коды делятся на простые и корректирующие. Простой код - такой код, который не обладает свойством обнаружения и исправления ошибок. В простых кодах все кодовые комбинации закреплены за определенным (дискретным) элементом дискретного сообщения, т.е. свободных неиспользуемых кодовых комбинаций не существует.

Корректирующий код - код, который обладает свойством обнаружения и исправления ошибок. Корректирующие свойства появляются за счет введения дополнительных избыточных символов. Можно обнаруживать одиночные ошибки. Для того, чтобы исправлять одиночные ошибки, нужно ввести дополнительный символ. Устройства, в которых происходит кодирование, называется кодером.

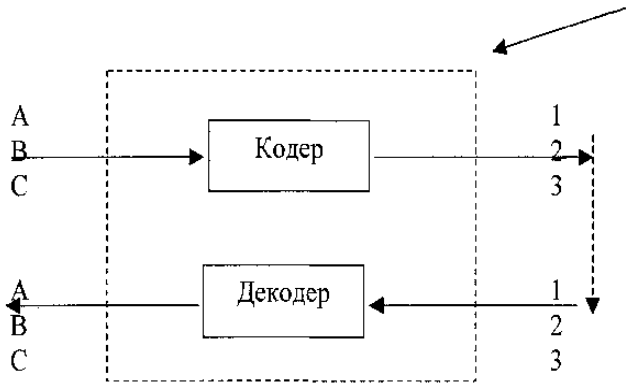


Рисунок 1.17 - Кодек

Устройство, в котором происходит обратный процесс, называется декодером.

1.5.4 Характеристики случайных сигналов.

Основное отличие случайных сигналов от детерминированных в том, что после наблюдения на конечном отрезке не возможно предсказать их будущее.

Все случайные сигналы и помехи непредсказуемы, поэтому для них сложно подобрать математическую модель (формулу) по которой можно рассчитать их мгновенные значения.

Для решения этой задачи используют теорию вероятностей.

Все случайные явления подразделяются на случайные события, случайные величины, случайные процессы.

Случайные события – это всякий факт, который в результате опыта происходит или не происходит (например, передача текста без ошибок).

Характеризуются частотой появления события $\nu = m/n$ и вероятностью $P(A) = l\ \underset{n\to\infty}{im}\ \nu$, где m число опытов, в которых появилось событие А, к общему числу n.

Величина, значения который меняются случайным образом, называется случайной (случайные величины X, Y, Z а значения которые они принимают (x, y, z). Случайные величины могут быть непрерывными и дискретными.

Случайный процесс $x(t)$, это функция времени, значения которой, при любом фиксированном значении аргумента t являются случайной величиной.

Случайные процессы бывают различных типов. Большинство случайных сигналов и помех относятся к стационарным эргодическим случайным процессам.

Случайный процесс называется стационарным, если его характеристики – функция распределения $F(x)$, плотность вероятности $P(x)$, математическое ожидание $M(x)$, дисперсия $D(x)$ не зависит от времени.

Случайные процессы, у которых усреднение по времени одной реализации приводит к тем же результатам, что и статическое усреднение по всем реализациям называются стационарными эргодическими.

Для описания случайного процесса используется функция корреляции $B_x(\tau)$ которая характеризует степень взаимосвязи между значениями случайного процесса в различные моменты времени t и $(t+\tau)$.

В качестве математических моделей случайных сигналов, в технике связи используются гауссовы случайные процессы.

Плотность вероятности гауссовского процесса:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\cdot\sigma}\cdot\exp[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}], \qquad (1.10)$$

где $m = M(x)$ – математическое ожидание;

$\sigma^2 = D(x)$ - дисперсия.

Функция распределения вероятности:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}] \cdot dx . \tag{1.11}$$

График функции $F(x)$ имеет вид возрастающей кривой от нуля до единицы.

1.5.5 Специфические сигналы. Узкополосные сигналы.

Сигнал можно считать узкополосным, если его спектральная плотность отлична от нуля лишь в пределах частотных интервалов шириной П, образующих окрестности точек $\pm\omega_0$, при этом должно выполняться условие $\Pi / \omega_0 << 1$.

По - видимому, если эти условия не выполнются, то сигнал будет широкополосным.

Математическую модель узкополосного сигнала, в общем виде, можно получить за счет линейной комбинации вида:

$$X(t) = A_x(t) \cdot \cos\omega_0 t - B_x(t) \cdot \sin\omega_0 t . \tag{1.12}$$

Функцию $A_x(t)$ принято называть синфазной амплитудой, а функцию $B_x(t)$ квадратурной амплитудой. Узкополосные сигналы можно считать квазигармоничексими колебаниями.

Белый шум - стационарный случайный процесс с постоянной на всех частотах спектральной плотностью мощности (название принято по аналогии с «белым» светом):

$$W(\omega) = W_0 = const . \tag{1.13}$$

Белый шум - это абстрактная математическая модель, но позволяет приближенно заменять реальные широкополосные случайные процессы.

Белый шум является дельта – коррелированным случайным процессом.

Практически все электрические сигналы, отображающие реальные сообщения содержат бесконечный спектр частот. Для неискажённой передачи таких сигналов потребовался бы канал с бесконечной полосой пропускания. С другой стороны, потеря на приёме хотя бы одной составляющей спектра приводит к искажению временной формы сигнала. Поэтому ставится задача передавать сигнал в ограниченной полосе пропускания канала таким образом, чтобы искажения сигнала удовлетворяли требованиям и качеству передачи информации. Таким образом, полоса частот - это ограниченный (исходя из технико-экономический соображений и требований к качеству передачи) спектр сигнала.

Ширина полосы частот ΔF определяется разностью между верхней F_B и нижней F_H частотами в спектре сообщения, с учётом его ограничения. Так, для периодической последовательности прямоугольных импульсов полоса сигнала ориентировочно может быть найдена из выражения:

$$П = \frac{1...2}{t_n}, \tag{1.14}$$

где t_n - длительность импульса.

Первичный телефонный сигнал (речевое сообщение), называемый также абонентским, является нестационарным случайным процессом с полосой частот от 80 до 12 000 Гц. Разборчивость речи определяется формантами (усиленные области спектра частот), большинство которых расположено в полосе 300 … 3400 Гц. Поэтому по рекомендации Международного консультативного комитета по телефонии и телеграфии (МККТТ) для телефонной передачи принята эффективно передаваемая полоса частот 300 … 3400 Гц. Такой сигнал называется сигналом тональной частоты (ТЧ). При этом качество передаваемых сигналов получается достаточно высоким - слоговая разборчивость составляет около 90%, а разборчивость фраз - 99% .

Сигналы звукового вещания. Источниками звука при передаче программ вещания являются музыкальные инструменты или голос человека. Спектр звукового сигнала занимает полосу частот 20…20000 Гц.

Для достаточно высокого качества (каналы вещания первого класса) полоса частот F_C должна составлять 50…10000 Гц, для безукоризненного воспроизводства программ вещания (каналы высшего класса) - 30…15000 Гц., второго класса - 100…6800 Гц .

В вещательном телевидении принят метод поочередного преобразования каждого элемента изображения в электрический сигнал с последующей передачей этого сигнала по одному каналу связи. Для реализации такого принципа на передающей стороне применяются специальные электронно-лучевые трубки, преобразующие оптическое изображение передаваемого объекта в развернутый во времени электрический видеосигнал.

Телевидение, равно как и световое кино, стало возможным благодаря инерционности зрения. Нервные окончания сетчатки глаза продолжают ещё какое-то время оставаться возбуждёнными после прекращения действия светового раздражителя. При частоте смены кадров F_k = 50 Гц глаз не замечает прерывистости смены изображения. В телевидении время считывания всех N строк (время кадра - T_k) выбирается равным T_k = с. С целью уменьшения мерцания изображения используется чересстрочная развертка. Вначале за время полукадра, считываются поочередно все нечетные строки, затем, за такое же время - все четные строки. Частота спектра видеосигнала получится при передаче изображения, представляющего

собой сочетание светлой и темной половины растра (рисунок 1.20). Сигнал представляет собой импульсы близкие по форме к прямоугольной. Минимальная частота этого сигнала при чересстрочной развертке частоте полей, т.е.

$$f_H = \frac{1}{T_{c.\max}} = \frac{1}{T_{k/2}} = F_{c.\min} = 50 \ Гц. \tag{1.15}$$

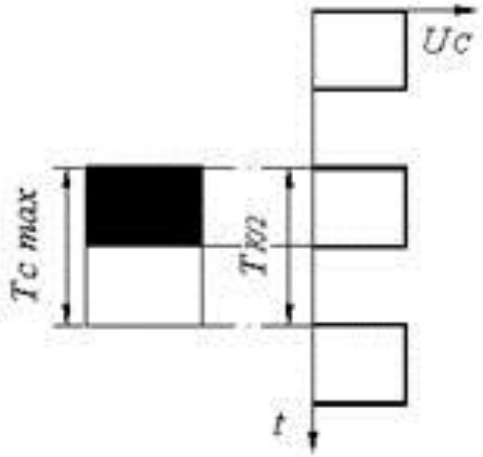


Рисунок 1.20 - К определению минимальной частоты спектра частот

Стандарт предусматривает разложение изображения в кадре на N = 625 строк. Меняющийся по строке сигнал получится, когда чередуются чёрные и белые квадратики. Минимальный период сигнала будет равен времени считывания пары квадратов:

$$t_{стр} = \frac{T_{П/К}}{N}; \tag{1.16}$$

$$T_{c\cdot\min} = \frac{t_{стр}}{n_{пар}}, \tag{1.17}$$

где $n_{пар}$ - число пар квадратов в строке.

Число квадратов (n) в строке будет равно:

$$n = k \cdot N = \frac{b \cdot N}{n}; \tag{1.18}$$

$$K = \frac{b}{n}, \tag{1.19}$$

где n - формат кадра (рисунок 1.21, а);

b – ширина;

h - высота поля кадра.

Тогда:

$$T_{\min} = \frac{t_{стр}}{n_{пар}} = \frac{T_{пк}}{N} : \frac{b \cdot N}{2h} = \frac{2T_{пк} \cdot h}{N^2 \cdot b}. \qquad (1.20)$$

Формат кадра принимается равным $k = 4/3$. Тогда верхняя частота сигнала F_B будет равна:

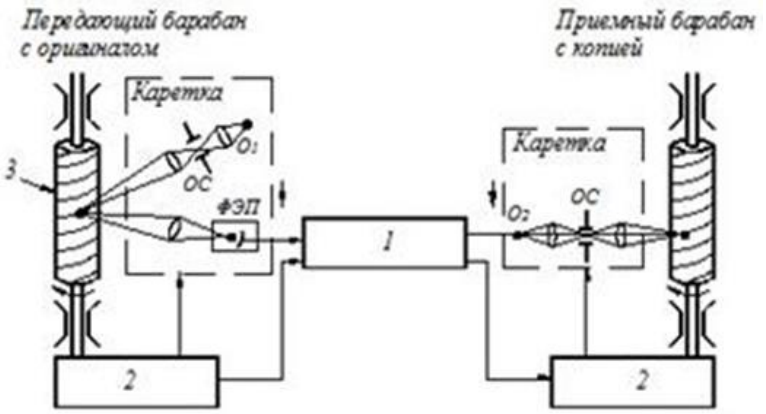
$$F_B \quad \frac{1}{T_{\min}} = \frac{b \cdot N^2 \cdot F_{П/К}}{n \cdot 2} = \frac{2}{3} \cdot N^2 \cdot f_{П/К} \qquad . \qquad (1.21)$$

При передаче 25 кадров в секунду с 625 строками в каждом номинальное значение частоты разложения по строкам (частота строк) равно 15.625 кГц. Верхняя частота телевизионного сигнала будет равна 6.5 МГц.

Согласно принятому в нашей стране стандарту напряжение полного видеосигнала $U_{ТВ}$, состоящего из импульсов синхронизации U_C, сигнала яркости и гасящих импульсов U_P составляет $U_{ТВ} = U_P + U_C = 1B$. При этом $U_C = 0.3 \cdot U_{ТВ}$, а $U_P = 0.7 \cdot U_{ТВ}$. Сигнал звукового сопровождения располагается выше по спектру ($fн_{ЗВ} = 8\,МГц$) видеосигнала. Обычно сигнал видео передаётся посредством амплитудной модуляции (АМ), а сигнал звука - частотной (ЧМ).

Иногда, в целях экономии полосы канала верхняя частота видеосигнала ограничивается значением $F_B = 6.0\,МГц$, а несущая звука передаётся на частоте $fн_{ЗВ} = 6.5\,МГц$.

Факсимильные сигналы. Факсимильная (фототелеграфная) связь - это передача неподвижных изображений (рисунков, чертежей, фотографий, текстов, газетных полос и так далее). Устройство преобразования факсимильного сообщения (изображения) преобразовывает световой поток, отражаемый от изображения, в электрический сигнал (рисунок 1.23).



1 - канал факсимильной связи; 2 - привод, синхронизирующие и фазирующие устройства; 3 - передающий барабан, на который помещается оригинал передаваемого изображения на бумажном носителе; ФЭП - фотоэлектронный преобразователь

отражённого светового потока в электрический сигнал; ОС - оптическая система для формирования светового луча.

Рисунок 1.23 - Функциональная схема факсимильной связи

При передаче чередующихся по яркости элементов сигнал приобретает вид импульсной последовательности. Частоту следования импульсов в последовательности называют частотой рисунка.

Максимального значения частота рисунка, Гц, достигает при передаче изображения, элементы и разделяющие их промежутки которого равны размерам развертывающего луча:

$$F_{рис.\max} = 1/(2\phi_и). \qquad (1.22)$$

Здесь $\phi_и$ – длина импульса, с равная длительности передачи элемента изображения, которую можно определить через параметры развертывающего устройства.

Так, если $p \cdot D$ - длина строки, а S - шаг развертки (диаметр развертывающего луча), то в строке $p \cdot D / S$ элементов. При N оборотах в минуту барабана, имеющего диаметр D, время передачи элемента изображения, измеряемое в секундах:

$$\tau_и = 1/(\frac{\pi \cdot D}{S} \cdot \frac{n}{60}); \qquad (1.23)$$

$$F_{рис.\max} = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{120 \cdot S}. \qquad (1.24)$$

Минимальная частота рисунка (при изменении по строке), Гц, будет при развертке изображения, содержащего по длине строки черную и белую полосы, равные по ширине половине длины строки. При этом:

$$F_{рис.\min} = N / 60. \qquad (1.25)$$

Для выполнения удовлетворительной по качеству фототелеграфной связи достаточно передавать частоты от $F_{рис\ min}$ до $F_{рис\ max}$. Международный консультативный комитет по телеграфии и телефонии рекомендует для факсимильных аппаратов N = 120, 90 и 60 об/мин; S = 0.15 мм; D = 70 мм. Из (1.2) и (1.3) следует, что при N = 120 $F_{рис\ max}$ = 1466 Гц; $F_{рис\ min}$ = 2 Гц; при N =60 $F_{рис\ max}$ = 733 Гц; $F_{рис\ min}$ = 1 Гц;

Телеграфные сигналы и сигналы передачи данных. Сообщения и сигналы телеграфии и передачи данных относятся к дискретным.

Устройства преобразования телеграфных сообщений и данных представляют каждый знак сообщения (букву, цифру) в виде определённой

комбинации импульсов и пауз одинаковой длительности. Импульс соответствует наличию тока на выходе устройства преобразования, пауза - отсутствию тока.

Для передачи данных используют более сложные коды, которые позволяют обнаруживать и исправлять ошибки в принятой комбинации импульсов, возникающие от действия помех.

Устройства преобразования сигналов телеграфии и передачи данных в сообщения по принятым комбинациям импульсов и пауз восстанавливают в соответствии с таблицей кода знаки сообщения и выдают их на печатающее устройство или экран дисплея.

Чем меньше длительность импульсов, отображающих сообщения, тем больше их будет передано в единицу времени. Величина, обратная длительности импульса, называется скоростью телеграфирования: $B = 1/ф_и$, где $ф_и$ - длительность импульса, с. Единицу скорости телеграфирования назвали бодом. При длительности импульса $ф_и = 1$ с скорость B = 1 Бод. В телеграфии используются импульсы длительностью 0.02 с, что соответствует стандартной скорости телеграфирования 50 Бод. Скорости передачи данных существенно выше (200, 600, 1200 Бод и более).

Сигналы телеграфии и передачи данных обычно имеют вид последовательностей прямоугольных импульсов.

При передаче двоичных сигналов достаточно зафиксировать только знак импульса при двуполярном сигнале либо наличие или отсутствие - при однополярном сигнале. Импульсы можно уверенно зафиксировать, если для их передачи используется ширина полосы частот, численно равная скорости передачи в бодах. Для стандартной скорости телеграфирования 50 Бод ширина спектра телеграфного сигнала составит 50 Гц. При скорости 2400 Бод (среднескоростная система передачи данных) ширина спектра сигнала равна примерно 2400 Гц.

Средняя мощность сообщений P_{CP} определяется путем усреднения результатов измерений за большой промежуток времени.

Средняя мощность, которую развивает случайный сигнал s(t) на резисторе сопротивлением 1 Ом:

$$P_{CP} = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} S^2(t)dt. \qquad (1.26)$$

Мощность, заключённую в конечной полосе частот между $щ_1$ и $щ_2$, определяют интегрированием функции G(щ) в соответствующих пределах:

$$P_{1,2} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} G(\omega)d\omega. \qquad (1.27)$$

Функция $G(\omega)$ представляет собой спектральную плотность средней мощности процесса, то есть мощность, заключённую в бесконечно малой полосе частот.

Для удобства расчетов мощность обычно дается в относительных единицах, выраженных в логарифмической форме (децибелах, дБ). Если эталонная мощность РЭ=1 мВт, то рх называют абсолютным уровнем и выражают в дБм. С учетом этого абсолютный уровень средней мощности:

$$p_{CP} = 10 \cdot \lg\left[P_{cp} / (P_Э = 1)\right]. \qquad (1.28)$$

Пиковая мощность $p_{пик}$ (е %) - это такое значение мощности сообщения, которое может превышаться в течение е % времени.

Пик-фактор сигнала определяется отношением пиковой мощности к средней мощности сообщения, дБ. Определим пик-фактор как разность абсолютных уровней пиковой и средней мощностей:

Под динамическим диапазоном D (е%) понимают отношение пиковой мощности к минимальной мощности сообщения P_{min}. Динамический диапазон, как и пик-фактор, принято оценивать в дБ:

Средняя мощность сигнала тональной частоты, измеренная в час наибольшей нагрузки (ЧНН), с учётом сигналов управления - набора номера, вызова и так далее - составляет 32 мкВт, что соответствует уровню (по сравнению с 1 мВт) $p_{ср}$ = -15 дБм

Максимальная мощность телефонного сигнала, вероятность превышения которой мала, равна 2220 мкВт (что соответствует уровню +3.5 дБм); минимальная мощность сигнала, который еще слышен на фоне шумов, принята равной 220000 пВт (1 пВт = 10^{-12} мВт), что соответствует уровню - 36. 5 дБм.

Средняя мощность P_{CP} сигнала вещания (измеренная в точке с нулевым относительным уровнем) зависит от интервала усреднения и равна 923 мкВт при усреднении за час, 2230 мкВт - за минуту и 4500 мкВт - за секунду. Максимальная мощность сигнала вещания 8000 мкВт.

Динамический диапазон D_C сигналов вещания составляет для речи диктора 25…35 дБ, для инструментального ансамбля 40…50 дБ, для симфонического оркестра до 65 дБ.

В соответствии с рекомендацией МККТТ мощность допустимых помех не должна превышать $P_П$ = 4000 пВт.

Первичные дискретные сигналы обычно имеют вид прямоугольных импульсов постоянного или переменного тока, как правило, с двумя разрешёнными состояниями (двоичные или двухпозиционные).

Скорость модуляции определяется количеством единичных элементов (элементарных посылок), передаваемых в единицу времени, и измеряется в бодах:

$$B = 1/\phi_и, \qquad (1.29)$$

где $\phi_и$ - длительность элементарной посылки.

Скорость передачи информации определяется количеством информации, передаваемой в единицу времени, и измеряется в бит/с.

В двоичных системах каждый элемент несет 1 бит информации, поэтому:

$$C_{мах} = B, бит/с. \qquad (1.30)$$

Аналоговый сигнал характеризуется непрерывным изменением своих параметров. Голос является типичным примером аналогового сигнала. Электронное оборудование использует аналоговые цепи для передачи непрерывных сигналов. Аналоговое электронное оборудование было распространено до появления компьютеров. Рассмотрим электрический свет, яркость которого регулируется с помощью реостата. Движение ручки реостата для установления необходимой яркости света является аналоговой операцией. В системе нет каких-либо дискретных состояний, так что можно легко регулировать яркость, прибавляя или убавляя ее.

Напротив, цифровой сигнал подразумевает дискретность значений параметров системы, проявляющуюся, например, в высвечивании значений времени на электронных часах. В цифровых системах вся информация существует в виде набора импульсов.

В отличие от ламп с плавными регуляторами яркости, лампы с переключателем яркости являются цифровыми устройствами. Каждому положению переключателя этих ламп соответствует определенный уровень яркости. Никаких других промежуточных уровней яркости не существует.

В основе любой цифровой системы лежит понятие бита. Бит является основной единицей цифровой информации, принимающей одно из двух значений: 1 или 0.

При решении инженерных задач, связанных с цифровыми системами, необходимо учитывать реальную форму импульса. Рисунок 1.24 показывает различные характеристики импульса. Амплитуда характеризует уровень энергии в импульсе. Время нарастания - время, в течение которого импульс увеличивается от 10% до 90% уровня максимальной амплитуды.

Время спада, противоположное времени нарастания, соответствует интервалу уменьшения амплитуды от 90% до 10%. Время нарастания и спада в ряде случаев может различаться.

Ширина импульса t соответствует временному интервалу, в течение которого амплитуда импульса превосходит уровень в 50% от максимальной амплитуды.

Длительность бита - временной интервал (T), приходящийся на один импульс.

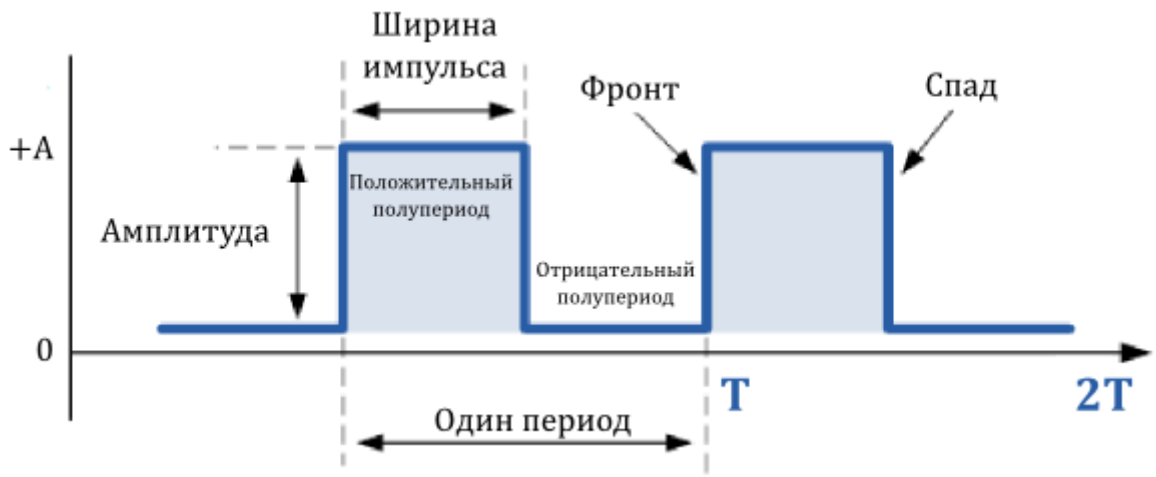


Рисунок 1.24 - Форма импульса

Системные часы (таймеры) генерируют короткие импульсы через промежутки времени постоянной длительности (тактовые импульсы) для определения длительности информационного бита. Длительность бита определяется одним или несколькими длительностями тактирующих импульсов. Тактирующие импульсы напоминают колебания метронома.

Время нарастания является очень важным параметром в электронике, поскольку оно ограничивает скорость работы системы. Действительно, скорость, с которой сигнал передачи может быть включен и выключен, будет определять максимальную частоту импульсов. Наиболее простой путь увеличения скорости работы системы - это уменьшение времени нарастания и спада импульса. При этом через систему проходит большее количество импульсов в течение заданного интервала времени. Наоборот, при увеличении времени нарастания импульса снижается скорость работы системы.

Существует много способов представления бита. В электронике достаточно часто необходимо описывать факт наличия или отсутствия напряжения. При цифровом представлении наличие напряжения соответствует единице, а его отсутствие - нулю. Значение одного бита 1 или 0 может представлять только два состояния системы — «включено» или «выключено». Например, состояние лампы может быть представлено 0, если она выключена, и 1 во включенном состоянии:

1) Выключена 0.
2) Включена 1.

Один бит информации, таким образом, имеет достаточно ограниченную емкость. Для описания состояний лампы с переключателем на три уровня яркости мы можем использовать 2 бита:

1) Выключена 00.
2) Малый уровень яркости 01.
3) Средний уровень яркости 10.
4) Максимальный уровень яркости 11.

В примере с лампой 2 бита позволяют различать четыре различных состояния лампы. Чем больше битов используется в одном блоке, тем больше его информационная емкость. В вычислительной технике обычно применяют блоки из 8 бит (либо с числами, кратными 8, такими как 16 или 32).

Восьмибитовый блок называется байтом. В одном байте можно с запасом хранить цифровую информацию обо всех буквах алфавита, числах и других символах печатной машинки или клавиатуры компьютера. Использование 8 бит допускает 256 различных вариантов перестановок 1 и 0. Число различных перестановок в цепочке длиной в n бит равно 2^n. Например, 16 бит дают 65536 комбинаций. При добавлении одного бита число возможных комбинаций удваивается.

Схематическое изображение цепочки импульсов представлено на рисунке 1.25. Переход из одного состояния в другое вдоль цепочки импульсов происходит мгновенно. Подобного рода упрощенные диаграммы отражают характеристики цепочек импульсов и дают инженерам и техникам возможность сравнивать их между собой. Цепочка импульсов соответствует последовательности 1 и 0 цифровой информации и может представлять собой чередование интервалов высокого и низкого уровней напряжения, либо его наличие и отсутствие. На языке электроники цифра 1 представляет наличие напряжения, либо его максимальное значение. Цифра 0 - отсутствие напряжения, либо его минимальное значение. Таким образом, о единице можно говорить, как о состоянии включено, или максимуме, а о нуле - как о состоянии выключено, или минимуме.

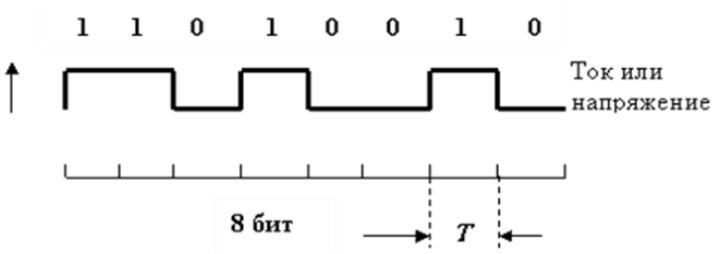


Рисунок 1.25 - Последовательность импульсов различной длины

В действительности изменение амплитуды импульса не происходит мгновенно, как показано на рисунке 1.25. Электронные системы имеют конечное время срабатывания. Требуется определенное время для того, чтобы значение напряжения сигнала перевести из состояния включено в состояние выключено, либо осуществить переключение между максимальным (высокое) и минимальным (низкое) значениями.

На практике пакет информации использует набор байтов, количество которых определяется условиями распространения информации.

2 Спектральное представление сигналов. Основные параметры и характеристики каналов. Виды модуляции. Многоканальная телефонная связь и методы разделения каналов в телефонной связи

2.1 Спектральное представление сигналов

Все сигналы могут быть подразделены на периодические, значения которых повторяются через определённые промежутки времени, и непериодические. Простейшим периодическим сигналом является гармоническое колебание:

$$S(t) = A \cdot \sin(\omega t),$$

где A, ω - амплитуда и угловая частота колебания.

Любой периодический сигнал состоит из гармоник. Значение амплитуд A_k, частот ω_k и начальных фаз φ_k которых можно найти, посредством разложения в ряд Фурье:

$$S(t) = A_0 + A_1 \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \cdot \sin(2\omega_1 t + \varphi_2) +$$

$$A_3 \cdot \sin(3\omega_1 t + \varphi_3) + \ldots = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \sin(k\omega_1 t + \varphi_k).$$

Если изобразить амплитуду A_k и фазу φ_k каждой гармоники на рисунке, то получим спектральные диаграммы. Распределение амплитуд A_k гармоник по частоте называется спектром амплитуд сигнала, а распределение фаз φ_k - спектром фаз. На рисунке 2.1 изображены временное и спектральное представления электрических сигналов.

Непериодический сигнал легко получить из периодического, увеличивая период вплоть до бесконечности (на рисунке 2.2 показано последовательное двукратное увеличение периода). Спектральные диаграммы, соответствующие каждому периоду приведены на рисунке 2.2.

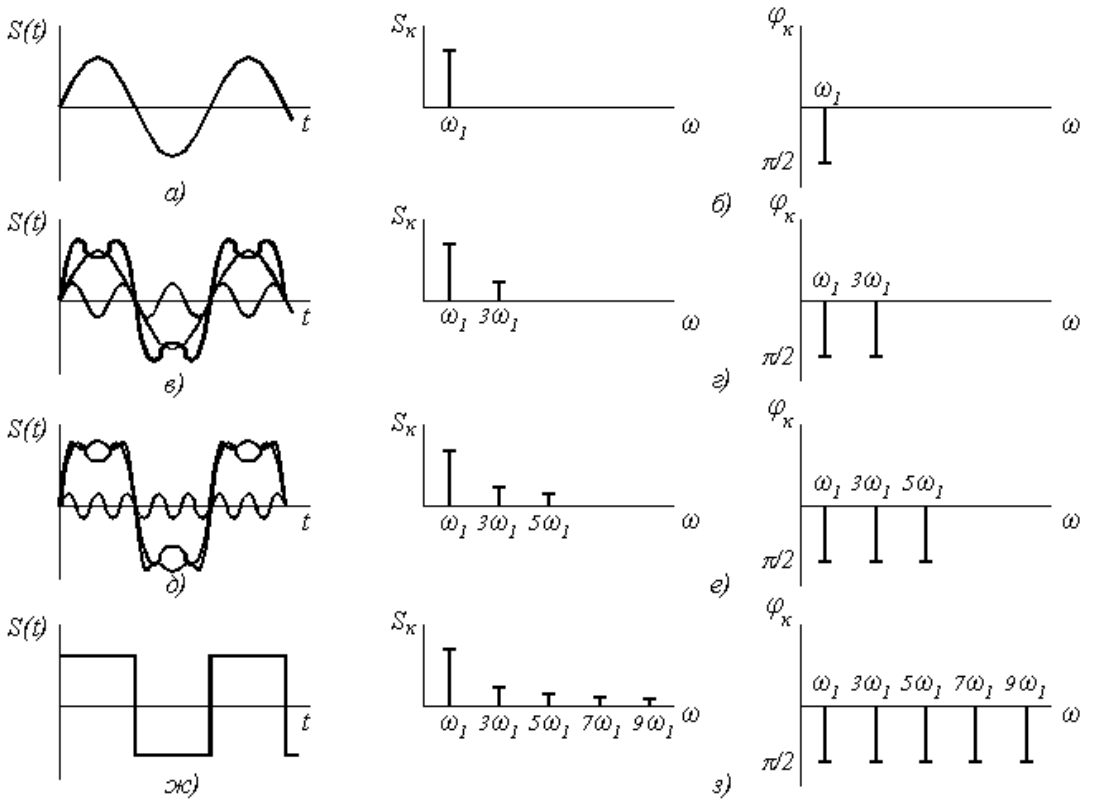


Рисунок 2.1- Временное и спектральное представления электрических сигналов

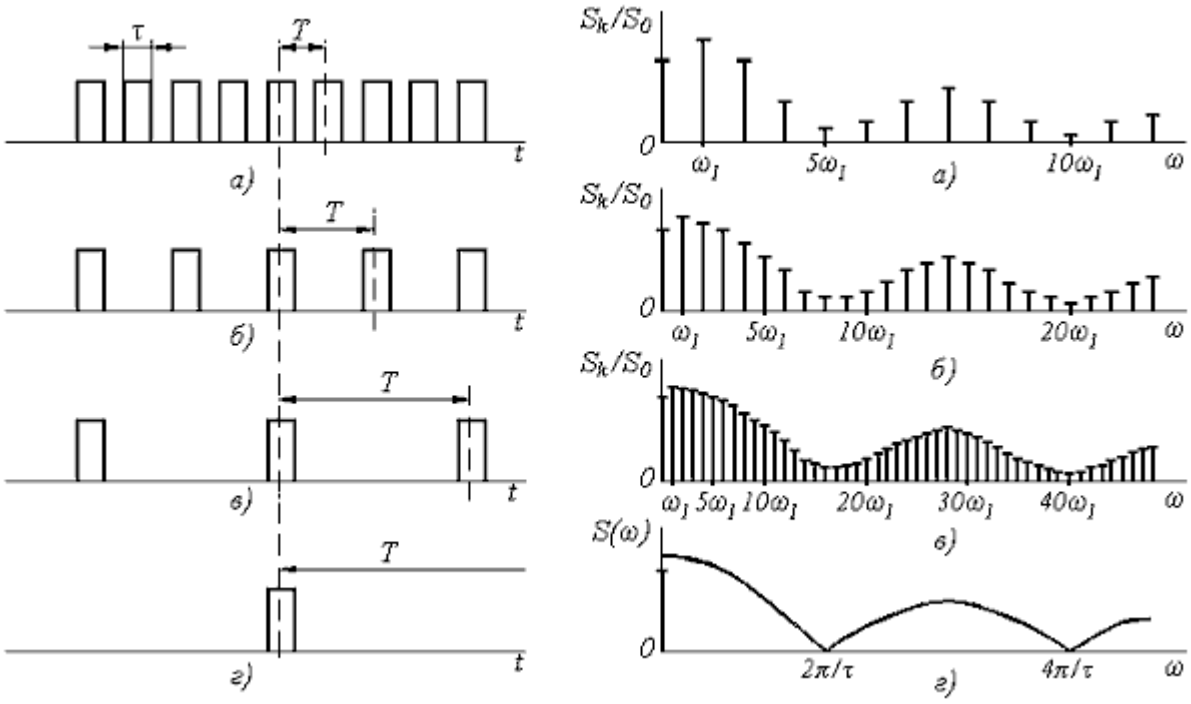


Рисунок 2.2 - Увеличение периода последовательности прямоугольных импульсов. Переход к спектральной плотности одиночного прямоугольного импульса

При увеличении периода сигнала частота первой гармоники понижается и спектральные линии становятся гуще. Амплитуды гармоник уменьшаются, так как энергия сигнала перераспределяется между возросшим числом гармоник. Понятие спектра амплитуд заменяется понятием спектральной плотности амплитуд (аналогично возникает понятие спектральной плотности фаз), которая указывает на удельный вес бесконечно малой амплитуды синусоидального колебания в любой бесконечно узкой полосе частот (рисунок 2.2, г). Таким образом, спектр непериодического сигнала является в общем случае не дискретным, а непрерывным.

2.2 Основные параметры и характеристики каналов

Канал ТЧ является основным на первичной сети. Он служит единицей при определении ёмкости СП и предназначен для передачи телефонных, телеграфных, факсимильных сигналов и сигналов передачи данных между станциями и узлами первичной сети связи. Каналы ТЧ образуются с помощью как СП с ЧРК, так и ЦСП с ИКМ. В соответствии со специфическими особенностями этих систем некоторые параметры образуемых ими каналов ТЧ также различны. Упрощенная схема организации канала ТЧ приведена на рисунке 2.3.

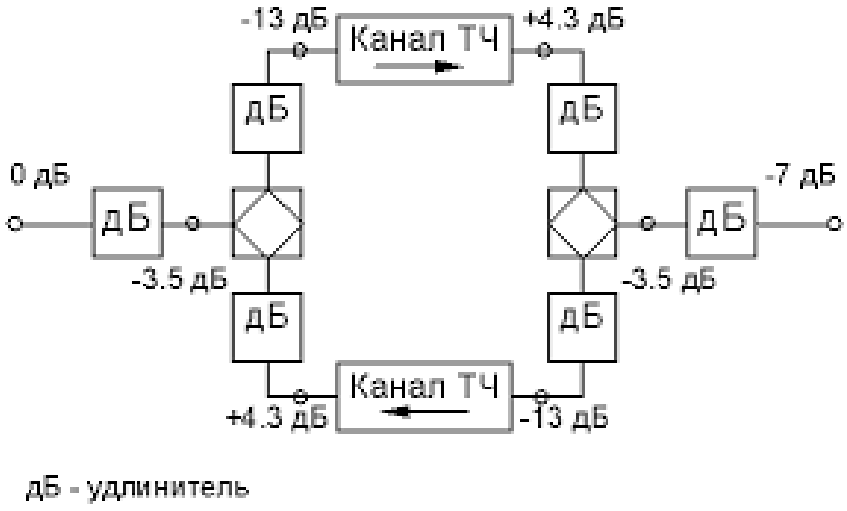


Рисунок 2.3- Упрощённая схема организации канала ТЧ

Телефонный канал включает в себя двухпроводное окончание и четырехпроводный тракт. Дифсистема (ДС) служит для перехода с четырехпроводного тракта к двухпроводному окончанию. Удлинители в двухпроводном окончании имеют затухание 3.5 дБ и называются транзитными. Характеристики канала ТЧ нормируются рекомендациями МСЭ-Т серии М.

Нормированные (номинальные) измерительные уровни в стандартных точках канала ТЧ составляют: на входе канала 0 дБм, на

выходе транзитного удлинителя минус 3.5 дБм, на входе четырехпроводного тракта минус 13 дБм, на выходе четырехпроводного тракта 4.3 дБм, на входе транзитного удлинителя минус 3.5 дБм и на выходе канала минус 7 дБм на частоте 800 Гц (1020 Гц для каналов, образованных ЦСП).

Многоканальные системы передачи с частотным и временным разделением каналов - это сложный комплекс технических средств, включающий в себя оконечную аппаратуру, устанавливаемую на оконечных пунктах (ОП), промежуточную аппаратуру, размещаемую в обслуживаемых (ОУП) или необслуживаемых (НУП) усилительных пунктах, а также линий связи (рисунок 2.4).

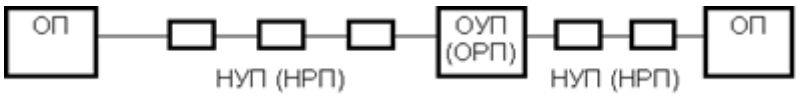


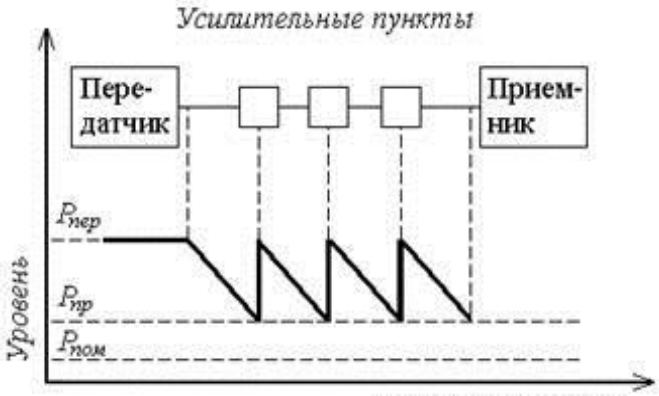
Рисунок 2.4 - Структурная схема построения систем передачи

В отличие от аналоговых систем во временных (цифровых) системах на обслуживаемых и необслуживаемых пунктах устанавливается аппаратура для восстановления (регенерации) импульсных сигналов линейного тракта. Отсюда обслуживаемые и необслуживаемые пункты в этих системах принято называть регенерационными (ОРП, НРП).

Поясним, для чего нужны усилительные и регенерационные пункты. Дальность передачи сигналов по физическим цепям (средам) определяется, прежде всего, затуханием (ослаблением) сигнала из-за того, что в цепи теряется часть энергии передаваемого сигнала. Конкретные электрические параметры цепи и чувствительность приемного устройства определяют допустимую дальность связи.

Например, при передаче речи мощность сигнала на выходе микрофона телефонного аппарата $P_{ПЕР}$ = 1 мВт, а чувствительность телефона приемного аппарата $P_{ПР}$ = 0.001 мВт. Таким образом, максимально допустимое затухание цепи не должно быть больше $a_{max}=10lg(P_{ПЕР}/P_{ПР}=10lg(1/0.001)=30$ дБ. Зная затухание a_{max} и километрический коэффициент затухания a, можно определить дальности передачи $l=a_{max}/a$.

В системах передачи применяется способ компенсации затухания сигналов повышением мощности сигнала в нескольких равномерно расположенных точках тракта. Часть канала связи между соседними промежуточными усилителями называется усилительным участком. Изменение уровней сигнала вдоль магистрали описывается диаграммой уровней, приведенной на рисунке 2.5.



$P_{ПЕР}$, $P_{ПР}$ - уровни сигнала на передаче и приеме, $P_{ПОМ}$ - уровень помехи

Рисунок 2.5 - Диаграмма уровней

Аппаратура ОУП и НУП служит не только для усиления аналогового сигнала, но и для коррекции (выравнивания) амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик линейного тракта. Аппаратура НРП и ОРП предназначена для восстановления амплитуды, длительности и временного интервала между импульсами сигнала цифровых систем.

Остаточное затухание канала - рабочее затухание (усиление) канала, определяемое в условиях замыкания входа и выхода канала на активные сопротивления нагрузок, равные номинальным значениям входного и выходного сопротивлений канала как четырёхполюсника. При согласовании всех элементов, образующих канал передачи, по входным сопротивлениям остаточное затухание можно определить как разность суммы затуханий и суммы усилений в канале:. Остаточное затухание канала ТЧ составляет 7 дБ. Максимальное отклонение во времени на одном транзитном участке не должно превышать 2.2 дБ с вероятностью 0.95.

Эффективно передаваемая полоса частот канала ТЧ - полоса, на крайних частотах которой (0.3 и 3.4 кГц) остаточное затухание на 8.7 дБ превышает остаточное затухание на частоте 800 Гц. Частотная характеристика отклонения канала ТЧ от номинала 7 дБ должна оставаться в пределах шаблона при максимальном числе транзитов, т.е. при 12 переприемных участках.

Фазочастотные искажения не являются столь существенным при передаче речи. Но так как каналы ТЧ используются также для передачи данных и факсимильной связи, большие фазочастотные искажения недопустимы. Поэтому нормируется отклонение группового времени передачи (ГВП) от его значении на частоте 1900 Гц на одном транзитном участке длиной 2500 км (рисунок 2.7).

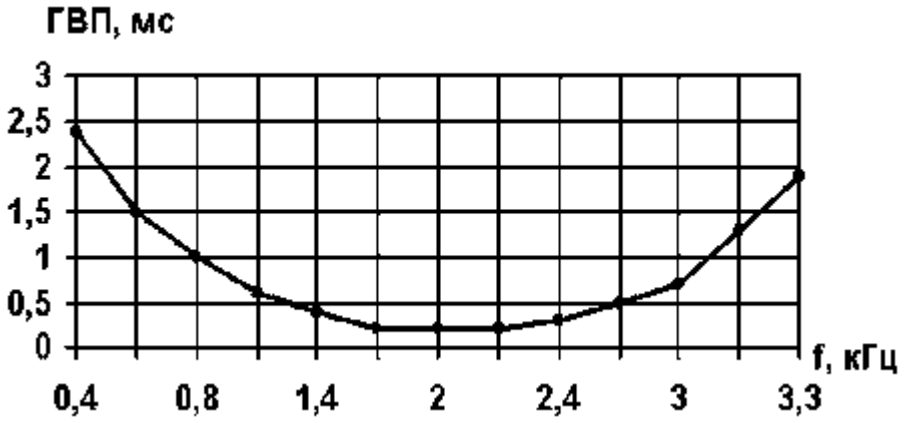


Рисунок 2.7 - Допустимые отклонения ГВП канала ТЧ

Коэффициент нелинейных искажений канала ТЧ на одном транзитном участке не должен превышать 1.5% (1% по третьей гармонике) при номинальном уровне передачи тока частотой 800 Гц. Амплитудная характеристика при этом нормируется следующим образом: остаточное затухание канала на одном транзитном участке должно оставаться постоянным с точностью 0.3 дБ при изменении уровня измерительного сигнала от - 17.5 дБ до 3.5 дБ в точке с нулевым измерительным уровнем на любой частоте пределах 0.3… 3.4 кГц. При повышении уровня измерительного сигнала до 8.7 и 20 дБ остаточное затухание должно уменьшиться не менее чем на 1.75 и 7.8 дБ соответственно.

2.2.1 Помехи в каналах ТЧ.

На выходе канала ТЧ кроме информационного сигнала присутствуют помехи, которые определяются на приемном конце в точке с относительным уровнем -7 дБ. Средняя величина псофометрического (взвешенного) напряжения помех в канале в течение любого часа на одном переприемном участке длиной 2500 км не должна превышать 1.1 мВ псоф. (10000 пВт псоф. В точке относительного нулевого уровня).

Стандартные каналы ТЧ, организованные с помощью цифровых и оптических систем передачи, являются более высококачественными. Нормы на амплитудно-частотные искажения заданы МСЭ-Т в виде шаблона (рисунок 2.8). Если сравнить допустимые отклонения остаточных затуханий цифровых и аналоговых каналов ТЧ, можно отметить, что нормы для цифровых каналов более жесткие. То же можно сказать и о фазочастотных искажениях (рисунок 2.9).

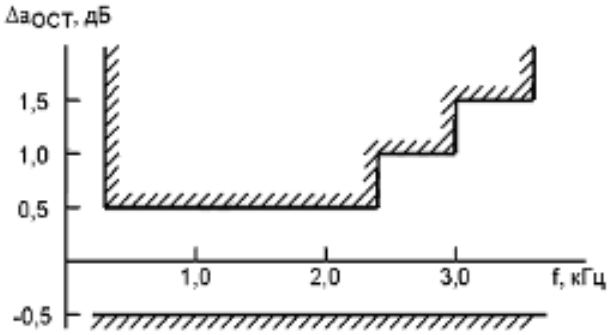


Рисунок 2.8 - Шаблон отклонений остаточного затухания цифрового канала ТЧ

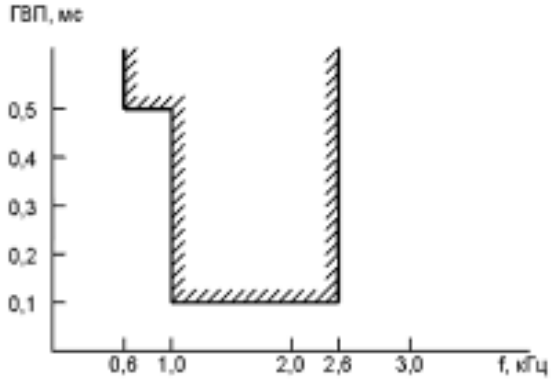


Рисунок 2.9 - Шаблон на допустимую неравномерность ГВП цифрового канала ТЧ

Для цифровых каналов ТЧ вводится дополнительная характеристика, которая оценивает шумы квантования. Эта характеристика задается в виде зависимости отношения сигнал-шум (ОСШ) от уровня сигнала (рисунок 2.10

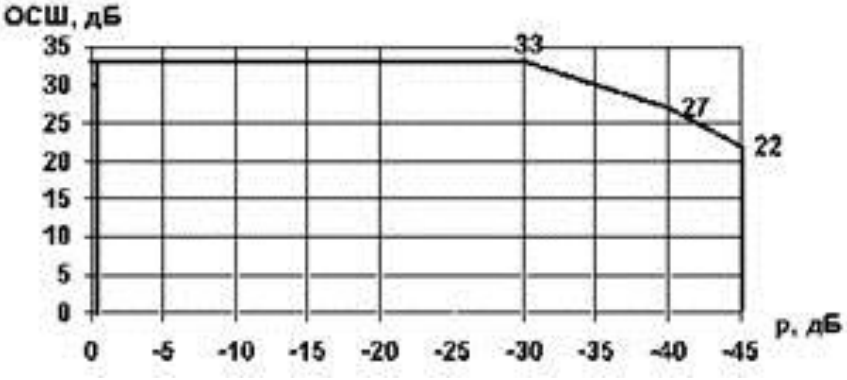


Рисунок 2.10 - Зависимость отношения сигнал/шум квантования от уровня сигнала

2.2.1 Широкополосные каналы.

Современные системы передачи позволяют организовать каналы с более высокой, чем канал ТЧ пропускной способностью. Увеличение пропускной способности достигается расширением эффективно передаваемой полосы частот (ЭППЧ), причем широкополосные каналы образуются объединением определённого количества каналов ТЧ.

Рабочие полосы частот сетевых трактов и каналов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Рабочие полосы частот сетевых трактов и каналов

Вид канала или тракта	Тракт	Канал
Предгрупповой	12,3…23,4	
Первичный	60,6…107 7	65…103
Вторичный	312,3…551,4	330…530
Третичный	812,6…2943,7	900…1900

2.2.2 Организация двусторонних каналов.

К большинству систем связи предъявляется требование обеспечения одновременной и независимой передачи сигналов в двух направлениях - требование двусторонней связи. Для организации двусторонней связи используются два канала однонаправленного действия, образующих двунаправленный четырехпроводный канал (рисунок 2.11). Проходящие через однонаправленный канал сигналы усиливаются ($S_{А-Б}$ и $S_{Б-А}$).

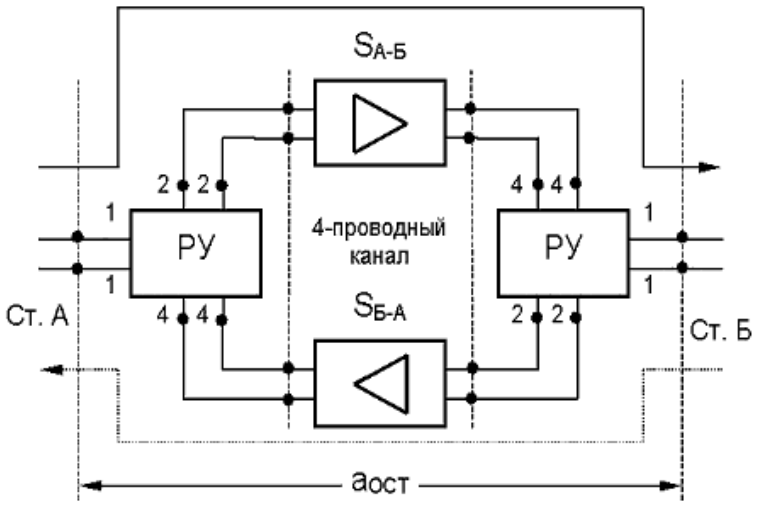


Рисунок 2.11 - Канал двустороннего действия

Двунаправленный двухпроводный канал образуется из четырехпроводного при помощи развязывающих устройств (РУ). Зажимы 1-1 РУ называют линейными. Прохождение сигналов от линейных зажимов РУ станции А к линейным зажимам РУ станции Б, а также в противоположном направлении показаны на рисунке 2.11 с помощью сплошной и штриховой линий.

Затухание сигналов между линейными зажимами станций А и Б называется остаточным затуханием двухпроводного канала:

$$a_{ОСТ} = a_{1\text{-}2} - S_{А\text{-}Б(БА)} + a_{4\text{-}1}.$$

Желательно, чтобы $a_{1\text{-}2}$ и $a_{4\text{-}1}$ были минимальны.

Основная трудность при организации перехода от четырех- к двухпроводному каналу с помощью РУ состоит в появлении петли обратной связи (ОС). Сигнал, попадая в двухпроводный канал, начинает циркулировать по петле ОС, что приводит к искажениям формы сигналов и в пределе - к самовозбуждению канала.

Затухание, которое претерпевает сигнал, проходя от зажимов 4-4 к зажимам 2-2 РУ, называется переходным $a_{ПЕР}$.

Затухание по петле ОС, равное сумме всех затуханий и усилений, $a_{ОС} = a_{ПЕР1} + a_{ПЕР2} - S_{А\text{-}Б} - S_{Б\text{-}А}$ носит специальное название - запас устойчивости. Если $a_{ОС}$ 0, то канал неустойчив и самовозбуждается.

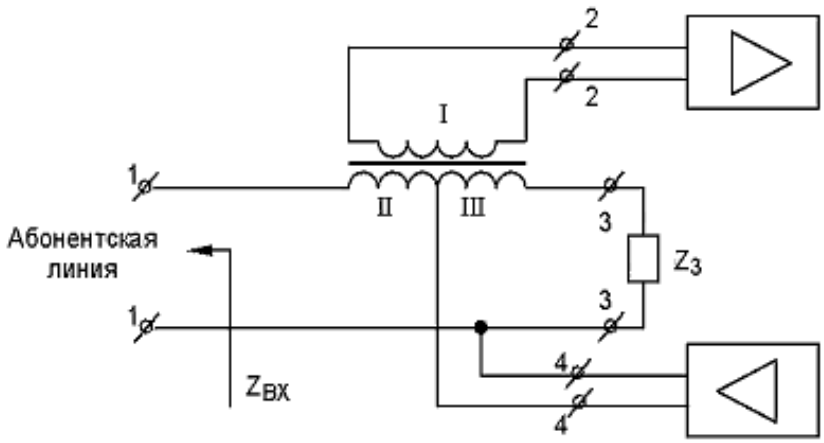


Рисунок 2.12 - Схема трансформаторной ДС

В качестве РУ в современных системах передачи широко используется дифференциальная система (ДС), выполненная на основе симметричного трансформатора со средней точкой (рисунок 2.12) (полуобмотки II и III идентичны). В состав ДС входит сопротивление Z_3, называемое балансным. Оно приближенно отражает свойства входного сопротивления абонентской линии.

К ДС предъявляются требования минимального затухания в рабочих направлениях и максимального переходного затухания. Данные требования выполняются при соблюдении так называемого условия баланса ДС. Условием баланса ДС в направлении 4-4 - 2-2 является равенство входного сопротивления абонентской линии и балансного сопротивления $Z_{BX}=Z_3$. Условием баланса ДС в направлении 1-1 - 3-3 является равенство входного сопротивления первой полуобмотки дифференциального трансформатора и входного сопротивления направления приема четырехпроводного канала $Z_{BX.TP.}=Z_4$.

В случае сбалансированной ДС мощность входных сигналов, подводимых к зажимам 1-1 и зажимам 4-4, передается на соответствующие выходные зажимы 2-2 и 1-1 не полностью, а лишь частично, и входные сигналы испытывают так называемые рабочие затухания ДС $a_{4-1} = a_{1-2} = 10\lg 2 = 3$дБ. В реальных ДС за счет не идеальности трансформатора рабочие затухания несколько больше.

Переходное затухание a_{42} реальной ДС также является конечной величиной. Оно зависит, в основном, от точности равенства входного сопротивления абонентской линии и балансного сопротивления. Точно выполнить это равенство на практике не представляется возможным, поскольку к одной и той же ДС могут подключаться абонентские линии с существенно различающимися характеристиками при неизменной величине балансного сопротивления. Величина переходного затухания a_{42} трансформаторных ДС может быть определена по формуле:

$$a_{42} = 20 \cdot \lg\left|\frac{Z_{BX} + Z_3}{Z_{BX} - Z_3}\right| + 6\partial Б;$$

$$a_б = 20 \cdot \lg\left|\frac{Z_{BX} + Z_3}{Z_{BX} - Z_3}\right|,$$

где a_{42}- балансное затухание трансформаторной ДС.

2.3 Виды модуляции

Первичные сигналы, поступающие из источника сообщений (преобразование сообщения в сигнал осуществляется в самом источнике), как правило, не могут быть непосредственно переданы по каналу (например, электрический сигнал по радио- или оптическому каналу), или могут быть переданы, но с большой степенью искажений, из-за чего качество передачи снижается. Чаще всего это происходит из-за низкочастотности первичных сигналов.

Чтобы осуществить эффективную передачу сигналов в какой-нибудь направляющей среде, необходимо использовать сигналы соответствующие

параметрам этой среды (в большинстве случаев по частотному диапазону). Такие сигналы называют *несущими сигналами* (сигналами-переносчиками) $u_{нес}(t)$. Они способны распространяться по данной линии связи наилучшим образом. Для введения сообщения, переносимого первичным информационным сигналом, в несущий сигнал используют процесс модуляции.

Модуляция – это процесс изменения одного или нескольких параметров несущего сигнала по закону изменения мгновенных значений первичного информационного (модулирующего) сигнала, воздействующего на него.

В подавляющем большинстве случаев используется изменение одного из параметров несущего сигнала при постоянстве остальных его параметров.

Параметр несущего сигнала, изменяющийся во времени под воздействием модулирующего сигнала, называется *информационным*, так как в его изменении заложено передаваемое сообщение, несущее информацию. Первичный информационный сигнал $u_{инф}(t)$ является *модулирующим сигналом,* устройство, осуществляющее модуляцию - *модулятором*. Вторичный сигнал, полученный в результате модуляции несущего сигнала - *модулированный сигнал* $u_{мод}(t)$.

Любой модулятор имеет два входа и один выход: информационный (модулирующий) сигнал, несущий сообщение (информацию); $u_{нес}(t)$- несущий сигнал (сигнал-переносчик), параметры которого соответствуют параметрам линии (канала); $s_{мод}(t)$- вторичный модулированный ВЧ сигнал.

Кроме того, главной особенностью любой модуляции является преобразование спектра информационного модулирующего сигнала в процессе модуляции, из-за чего модуляторы часто называют преобразователями частоты. В общем случае происходит расширение спектра, а при гармоническом несущем сигнале спектр информационного сигнала переносится в область частот в окрестность частоты несущего сигнала (обычно из НЧ диапазона в ВЧ диапазон).

Модулированные сигналы и виды модуляции различаются по виду несущего сигнала и по модулируемому (информационному) параметру. Наиболее часто в качестве несущего сигнала используются:

- гармонический сигнал (при аналоговой и дискретной модуляциях);
- периодическая последовательность видеоимпульсов (при импульсной модуляции). В таблице 2.2 дана общая классификация видов модуляции по виду несущего и модулирующего сигналов.

Даже при гармоническом несущем сигнале теоретически возможно бесконечное число видов модуляции. Практически в настоящее время в системах связи используется более пятидесяти видов модуляции и число их продолжает расти. Это связано с тем, что различные виды модуляции имеют разную помехоустойчивость, ширину спектра и сложность реализации модуляторов и демодуляторов.

Таблица 2.2 - Общая классификация видов модуляции

Вид модуляции	Вид модулирующего (информационного) сигнала $u_{инф}(t)$	Вид несущего сигнала $u_{нес}(t)$
Аналоговая	Аналоговый	Аналоговый (обычно гармонический)
Дискретная (цифровая)	Дискретный(двоичный или цифровой)	Аналоговый (обычно гармонический)
Импульсная	Аналоговый	Импульсный(обычно периодическая последовательность прямоугольных видеоимпульсов)

Вопрос выбора вида модуляции и вида несущего сигнала для системы связи решается не только с точки зрения эффективности прохождения сигнала по линии связи (по каналу) и простоты операций модуляции и демодуляции, но, в первую очередь, с точки зрения способности вида модуляции обеспечить заданное качество передачи сообщений (по верности и скорости передачи) при наличии помех.

Параметры $A_{0,}\, f_0, \theta_0$ несущего колебания:

$$a(t) = A_0 \cos(\omega t + \theta_0),$$

$$a(t) = A_0 \cos(\omega_0 * t + \theta_0)$$

и модулирующего сигнала:

$$s(t) = E \cos(\Omega \cdot t + \gamma),$$

где A_0 – амплитуда несущего колебания;

f_0 – частота несущего колебания;

θ_0 – начальная фаза несущего колебания;

E – амплитуда модулирующего колебания;

Ω – частота модулирующего колебания;

γ – начальная фаза модулирующего колебания.

В гармоническом несущем колебании:

$$a(t)=A(t) \cos(\omega t+\theta) \qquad (2.1)$$

можно изменять пропорционально модулирующему колебанию $s(t)$, однозначно связанному с передаваемым сообщением, амплитуду:

$$A(t) = A_0 + k_{AM}\,, \tag{2.2}$$

начальную фазу:

$$\theta(t) = \theta_0 + k_{ФМ} \quad . \tag{2.3}$$

частоту:

$$\omega(t) = \omega_0 + k_{ЧМ} \quad . \tag{2.4}$$

В соответствии с этим получаем амплитудно-модулированные (АМК), фазо-модулированные (ФМК) и частотно-модулированные колебания (ЧМК).

Полная фаза: АМК:

$$\theta(t) = \omega_0 t + \theta_0\,; \tag{2.5}$$

ФМК:

$$\theta(t) = \omega_0 t + \theta_0 + k_{ФМ}\ s(t)\,; \tag{2.6}$$

ЧМК:

$$\theta(t) = \omega_0 t + \theta_0 + k_{ЧМ}\ \ s(t)^{\int s(t)\frac{t}{0}dt}\ . \tag{2.7}$$

Аналитическое выражение АМК в общем случае:

$$a(t) = \left[A_0 + k_{AM} s(t)\right]\cdot\cos(\omega_0 + \theta_0)\,: \tag{2.8}$$

ФМК:

$$a(t) = A_0 \cdot \cos\left[\omega_0 t + \theta_0 + k_{ФМ} s(t)\right]. \tag{2.9}$$

ЧМК:

$$a(t) = A_0 \cdot \cos\left[\ \omega_0 t + \theta_0 + k_{ЧМ} s(t)^{\int_0^t s(t)dt}\ \right]. \tag{2.10}$$

Мгновенная частота АМК:

$$\omega(t) = \omega_0\,. \tag{2.11}$$

ФМК:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = \omega_0 + k_{ФМ}\frac{ds(t)}{dt}\,. \tag{2.12}$$

ЧМК:

$$\omega(t) = \omega_0 + k_{ЧМ} s(t)\,. \tag{2.13}$$

2.3.1 Особенности тональной модуляции.

В случае тональной модуляции:

$$s(t) = S_0 \cdot \cos(\Omega t + \gamma)\,, \tag{2.14}$$

аналитическое выражение АМК:

$$a(t) = [1 + M\cos(\Omega t + \gamma)]\cos(\omega_0 t + \theta_0), \qquad (2.15)$$

где

$$M = \frac{K_{AM} S_0}{A_0}. \qquad (2.16)$$

ФМК:

$$a(t) = A_0 \cdot \cos[\omega_0 t + \theta_0 + m \cdot \cos(\Omega t + \gamma)], \qquad (2.17)$$

где

$$m = k_{ФМ} S_0.$$

ЧМК:

$$a(t) = A_0 \cdot \cos[\omega_0 t + \theta_0 + m \cdot \sin(\Omega t + \gamma)], \qquad (2.18)$$

где

$$m = \frac{K_{AM} S_0}{\Omega} = \omega_g / \Omega. \qquad (2.19)$$

Для построения спектров выражение (2.15), (2.17) и (2.18) целесообразно представить в развернутом виде:

$$a(t) = A_0 \cdot \cos(\omega_0 t + \theta_0) + \frac{MA_0}{2}\cos[\omega_0 - \Omega)t + \theta_0 + \gamma] + \frac{MA^2}{2}\cos[(\omega_0 - \Omega)t + \theta_0 + \gamma]; \qquad (2.20)$$

$$a(t) = A_0 \cdot \sum J_n(m)\cos[(\omega_0 + n\Omega)t + n\gamma + \theta_0)], \qquad (2.21)$$

где $J_n(m)$ – функция Бесселя первого рода порядка n с индексом модуляции m в качестве аргумента.

Если в несущем колебании изменяется частота w_0, то имеем дело с частотной модуляцией (ЧМ), если же изменяется фаза j_0 – фазовой модуляцией (ФМ).

Частотная модуляция. При частотной модуляции несущая частота w(t) связана с модулирующим сигналом $e(t)$ зависимостью:

$$\omega(t) = \omega_0 + k_ч e(t), \qquad (2.22)$$

где $k_ч$ - размерный коэффициент пропорциональности между частотой и напряжением, рад.

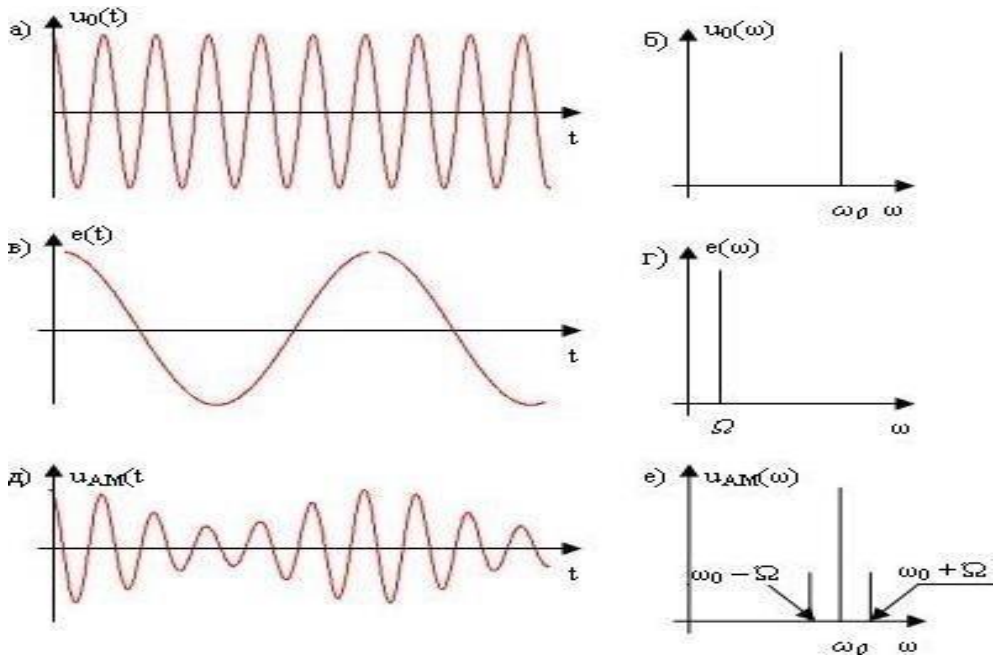


Рисунок 2.13 - Амплитудная модуляция

Фазовая модуляция. В ФМ сигнале полная фаза несущего колебания изменяется пропорционально модулирующему напряжению:

$$y(t) = \omega_0 t + k_\Phi e(t), \qquad (2.23)$$

где k_Φ - размерный коэффициент пропорциональности, рад/В.

2.3.2 Амплитудно - импульсная модуляция.

Преобразование аналогового сигнала в цифровой сигнал в АЦП осуществляется последовательно в несколько этапов.

1) Дискретизация аналогового сигнала во времени, то есть замена исходного аналогового сигнала U_a (t) его дискретными отчетами U_g (nT_g), взятыми через интервал времени (интервал дискретизации T_g), который выбирается согласно теореме Котельникова: $T_g \leq 1/2F_в$, где $F_в$ – верхняя частота в спектре аналогового сигнала.

Для НЧ сигнала, в спектре которого есть постоянная составляющая, $T_g \leq 1/2\Delta F$, где ΔF –ширина спектра сигнала, Гц;

2) Квантование дискретных отсчетов сигнала по амплитуде (по уровню), т.е. замена значений дискретных отсчетов $U_g(nT_g)$ на значение ближайших разрешенных уровней квантования – $U_{кв}$ (nT_g).

3) Кодирование номеров уровней, соответствующих значениям квантованных отсчетов сигналов. Кодирование заключается в замене значений квантованных отсчетов кодовыми комбинациями двоичного кода номера уровня квантования.

2.3.3 Импульсная модуляция.

При импульсной модуляции в качестве несущего колебания (точнее, поднесущего) используют различные периодические импульсные последовательности, в один из параметров которых вводится информация о передаваемом сообщении. Для дискретных сигналов процесс модуляции принято называть манипуляцией параметров импульсов.

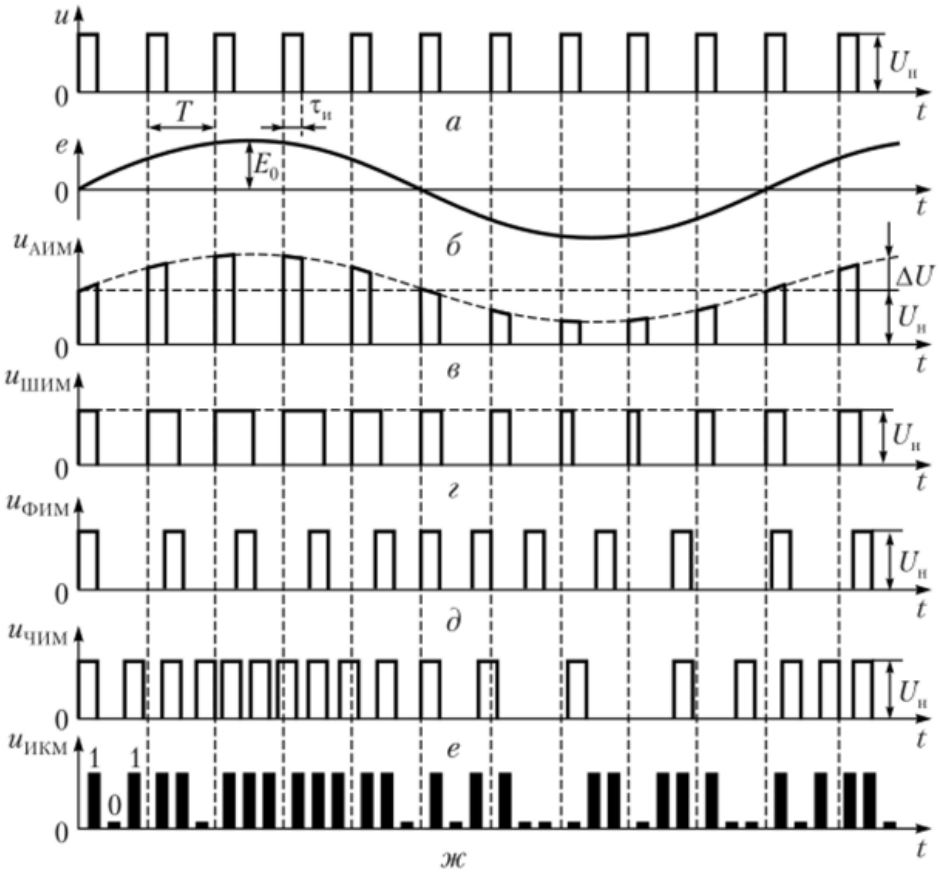
Теоретической основой построения всех методов импульсной модуляции является теорема Котельникова, в соответствии с которой непрерывный первичный сигнал $e(t)$ с ограниченной шириной спектра $F_В$ может быть передан своими отсчетами (последовательностью коротких импульсов), следующих с интервалом (в радиотехнике при представлении импульсных, дискретных и цифровых сигналов часто употребляется обозначение периода T через $\Delta T = \Delta t = 1/(2\ F_В)$.

Достаточно большие временные интервалы между импульсами используют для передачи рабочих импульсов от других источников, т.е. для осуществления многоканальной передачи с временным разделением каналов. Положим, что поднесущим колебанием в системе передачи информации с импульсной модуляцией является периодическая последовательность прямоугольных импульсов с амплитудой $U_н$, длительностью $t_и$ и периодом повторения T (рисунок 2.16, *а*). Для наглядности и упрощения математических выкладок выберем в качестве модулирующего сигнала гармоническое колебание $e(t) = y$ которого начальная фаза $q_0 = 90^o$ (рисунок 2.16, *б*).

Импульсную модуляцию в зависимости от выбора изменяемого параметра модулируемой импульсной последовательности принято делить на следующие виды:

- амплитудно-импульсную (АИМ), когда по закону передаваемого сообщения изменяется амплитуда импульсов исходной последовательности (рисунок 2.16, *в*);
- широтно-импульсную (ШИМ), при изменении по закону передаваемого сообщения длительности (ширины) импульсов исходной последовательности (рисунок 2.16, *г*);
- фазоимпульсную (ФИМ), или времяимпульсную (ВИМ), если по закону передаваемого сообщения изменяется временное положение импульсов (рисунок 2.16, *д*);
- частотно-импульсную модуляцию (ЧИМ), при изменении по закону передаваемого сообщения частоты следования импульсов поднесущей (рисунок 2.16, *е)*;
- импульсно- кодовая модуляция (ИКМ) – вид дискретной (цифровой) модуляции (цифровой манипуляции), при которой передаваемый аналоговый первичный сигнал превращается в цифровой код – последовательность импульсов (1-«единиц») и пауз (0-«нулей»), имеющих одинаковую длительность, применяется наиболее широко в современной

радиоэлектронике и системах связи. Этот вид импульсной модуляции представлен на рисунке 2.16, ж.



а - периодическая последовательность исходных импульсов; *б* – модулирующий сигнал; *в* – АИМ; *г* – ШИМ; *д*- ФИМ; *е* – ЧИМ; *ж* – ИКМ.

Рисунок 2.15 - Импульсная модуляция

2.3.3.1 Амплитудно-импульсная модуляция. В качестве примера, позволяющего оценить параметры и характеристики импульсно-модулированных колебаний, рассмотрим АИМ – сигнал и определим его спектр при модуляции импульсной последовательности гармоническим колебанием $e(t) = E_0 \cos Wt$.

С аналитической точки зрения процедуру получения АИМ – сигнала $u_{АИМ(t)}$ удобно рассматривать как непосредственное умножение непрерывного передаваемого сигнала $u(t)$ на вспомогательную последовательность $y(t)$ прямоугольных видеоимпульсов единичной амплитуды.

Представим периодическую последовательность прямоугольных немодулированных видеоимпульсов $u(t)$, имеющих амплитуду $U_Н$, длительность $t_и$ и период повторения T, тригонометрическим рядом Фурье. Приведем формулу несущего колебания:

$$u_н(t) = U_H \cos\omega_0 \cdot t, \qquad (2.24)$$

и обобщенную функцию $u(t)$, описывающую последовательность прямоугольных импульсов. Тогда АИМ сигнал можно записать в виде:

$$u_{АИМ}(t) = u(t)y(t); \qquad (2.25)$$

$$u_{АИМ}(t) = (1 + M\cos Wt)u(t). \qquad (2.26)$$

В этом соотношении параметр $M = \Delta U / U_т$ - коэффициент (глубина) модуляции импульсов. Подставляя значение $u(t)$ в (2.27), после несложных преобразований запишем выражение для АИМ сигнала:

$$u_{АИМ}(t) = A_0 + A_0 M\cos\Omega t + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_1 t - \varphi_n) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n M}{2}\cos[(n\omega_1 + \Omega)t - \varphi_n] +$$
$$+ \sum_{1}^{\infty} \frac{A_n M}{2}\cos[(n_1\omega_1 - \Omega)t - \varphi_n]; \qquad (2.27)$$

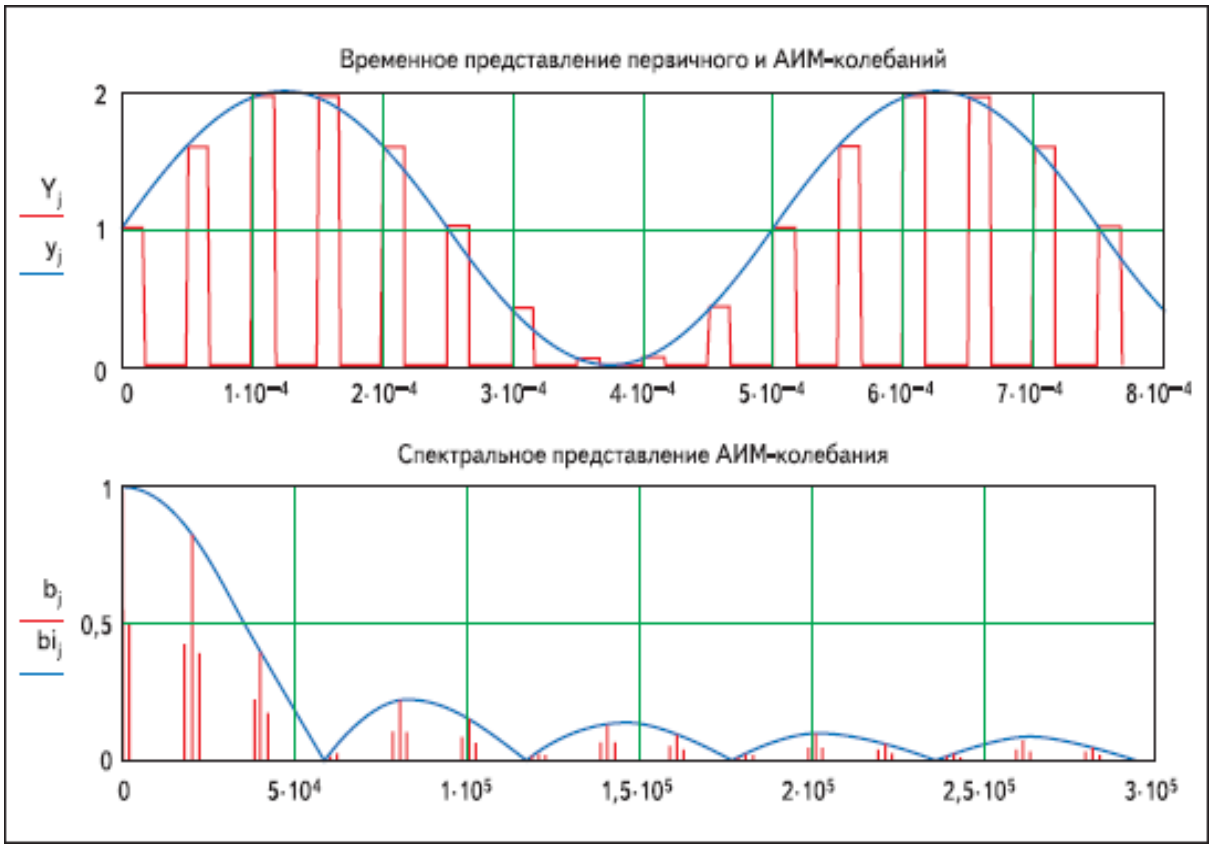


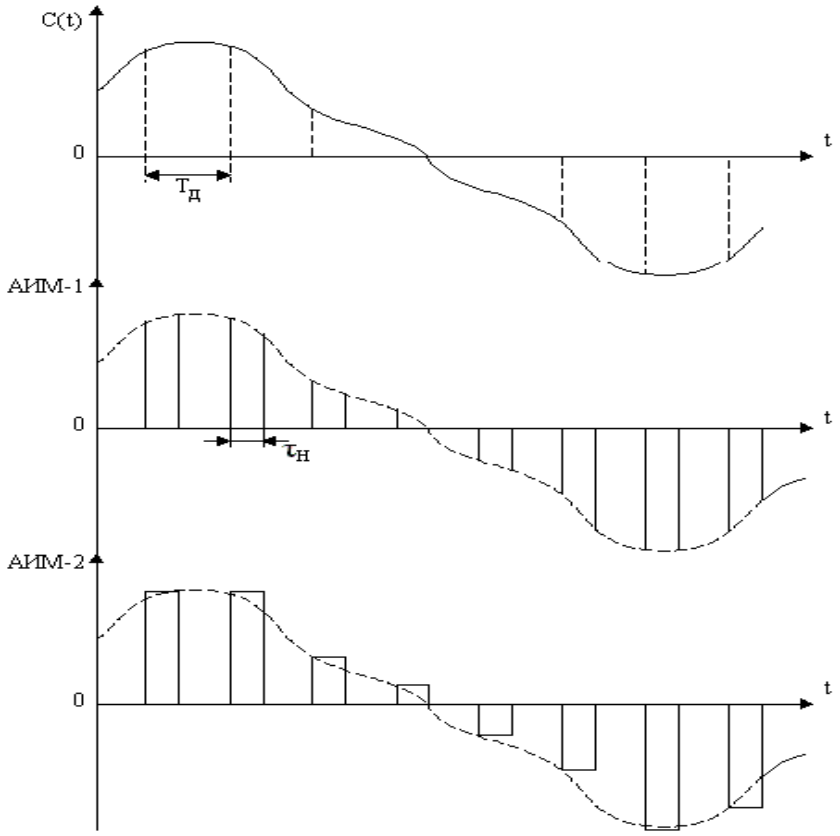
Рисунок 2.16 - Спектр сигнала при амплитудно-импульсной модуляции

Из соотношения следует, что при однотональной амплитудно - импульсной модуляции последовательности прямоугольных видеоимпульсов спектр АИМ – сигнала содержит постоянную составляющую A_0, гармонику A_0M частоты W модулирующего колебания и высшие гармонические составляющие A_n частоты следования импульсов несущей nw_1, около каждой из которых симметрично попарно расположены боковые составляющие с частотами nw_1+W и nw_1 - W (рисунок 2.17).

Основные виды АИМ – сигналов. Сигналы АИМ подразделяются на два основных вида: сигнал первого рода - АИМ -1 (см.рисунок 2.18, *б*) и сигнал второго рода – АИМ –II (рисунок 2.18, *в)*

Мгновенное значение амплитуды импульсов сигнала АИМ -1 зависит от мгновенного значения модулирующего колебания e(t) (рисунок 2.18, *а*), а амплитуда импульсов сигнала АИМ-II определяется только значением модулирующего колебания в тактовых точках (рисунок 2.18, *б*). Тактовые моменты могут совпадать с началом импульса, любой точкой его середины или концом. Поэтому при АИМ-II несущая последовательность характеризуется еще одним параметром – положением импульсов относительно тактовых точек.

Различие между сигналами АИМ 1 и АИI 2 оказывается существенным, если длительность импульсов $t_и$ сравнима с периодом их следования методов АИМ для передачи сообщений необходимо знать полосу частот используемых сигналов.



а – импульсная несущая; *б*- АИМ-I; *в*- АИМ –II.

Рисунок 2.17 - Формирование АИМ-сигналов

Оценим спектр импульсного радиосигнала типа АИМ-1 при реальном модулирующем колебании.

2.3.3.2 Амплитудно-импульсная модуляция (АИМ) и ИКМ. Передача квантованных значений сигнала с помощью коротких импульсов различной высоты называется амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ). Под импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ) понимается передача непрерывных функций при помощи двоичного кода. При кодовой модуляции необходимо передать числа, выражающие величину квантованных отсчетов. Для этого можно воспользоваться двоичным кодом. Кодирование - закон построения сигнала. В результате кодирования дискретные элементы сообщения заменяются совокупностью элементарных сигналов. Обычно в качестве элементарных сигналов используют 0 и 1.

Количество элементарных сигналов, из которых состоит кодовая комбинация, характеризует длительность кодовой комбинации и называется значимостью кода. Коды существуют равномерные и неравномерные.

Равномерным - называется такой код, кодовая комбинация которого состоит из одинакового количества элементарных сигналов.

Неравномерным - называется такой код, кодовые комбинации которого состоят из различного количества элементарных сигналов. По помехоустойчивости коды делятся на простые и корректирующие. Простым кодом называется такой код, который не обладает свойством обнаружения и исправления ошибок. В простых кодах все кодовые комбинации закреплены за определенным (дискретным) элементом дискретного сообщения, т.е. свободных неиспользуемых кодовых комбинаций не существует. Устройства в которых происходит кодирование, называется кодером.

Устройство, в котором происходит обратный процесс, называется декодером.

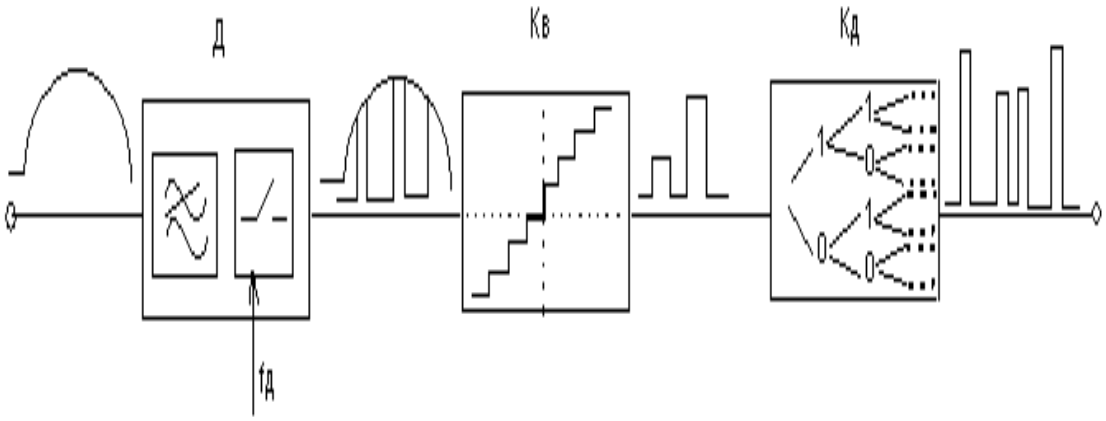


Рисунок 2.18 – Система передачи с ИКМ

В системах с ИКМ в тракт передачи передаются лишь отдельные значения аналоговых сигналов, взятые в определенные моменты времени, т.е. происходит дискретизация сигналов по времени (рисунок 2.18).

Это наиболее распространенный метод цифровой модуляции.

Для осуществления ИКМ необходимо произвести три операции:

1) Дискретизация сигналов по времени (получаем АИМ сигнал).
2) Квантование полученных импульсов по амплитуде.
3) Кодирование квантованных по амплитуде импульсов.

Дискретизация по времени состоит в том, что аналоговый сигнал заменяется АИМ сигналом, амплитуда импульсов в котором равна соответствующему мгновенному значению информационного сигнала в соответствующие моменты времени.

Частота дискретизации $F_д$ выбирается на основании теоремы Котельникова

$$F_д \geq 2F_{верх}.$$

После дискретизации полученный АИМ сигнал подвергают квантованию по уровню (или по амплитуде).

Для передачи непрерывных сообщений используют метод ИКМ. Речевые и другие непрерывные сигналы в аппаратуре с ИКМ преобразуются в дискретные.

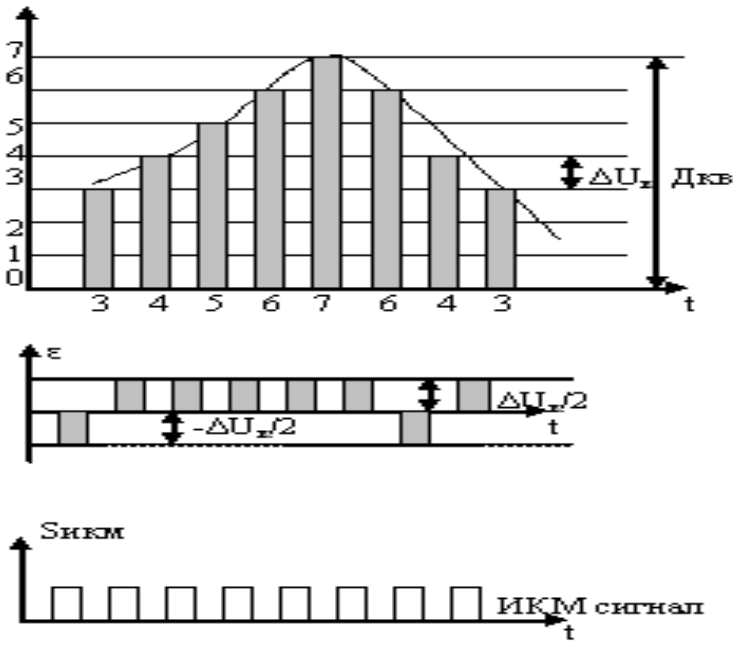
Во-первых, осуществляется дискретизация сигналов по времени, то есть непрерывный сигнал заменяется совокупностью его последовательных отсчетов.

Во-вторых, непрерывное множество значений сигнала заменяется дискретным множеством значений, разрешенных для передачи. Это операция называется квантованием или дискретизацией по уровню, а разрешенные значения сигнала – уровнями квантования.

В-третьих, полученные уровни квантования кодируются. Под кодированием понимается процесс преобразования квантованных по уровню отсчетов сигнала в последовательность кодовых групп.

Кодовая группа представляет собой совокупность импульсных посылок, выражающих некоторое число, например, порядковый номер уровня квантования в определенной системе счисления.

Таким образом, в системах связи с ИКМ непрерывный сигнал источника информации для передачи по линиям связи преобразуется в цифровую последовательность. На приемной стороне производится обратное цифро-аналоговое преобразование сигналов (декодирование).



0-7 – шкала квантования; $Д_{кв}$ – динамический диапазон квантования; $\Delta U_к$ – шаг квантования.

Рисунок 2.19 – Квантование по уровню

Систему связи с ИКМ можно назвать цифровой системой передачи непрерывных сообщений.

Если расстояния между параллельными линиями одинаковые, то квантование равномерно.

Расстояние между верхней и нижней линиями этой системы линий определяется динамическим диапазоном дискретизированного сигнала.

Если расстояния между параллельными линиями одинаковые, то квантование называется равномерным.

Каждая из параллельных линий представляет собой уровень квантования.

Сущность квантования состоит в том, что мгновенным значениям амплитуды импульсов присваиваются ближайшие разрешенные значения сигнала. Так как в процессе квантования значение квантованного сигнала отличается от истинного значения сигнала в соответствующие моменты времени, то возникает ошибка квантования, которая при данном способе квантования равна $\varepsilon_{max}=\Delta Uкв/2$ и называется шумом квантования.

В процессе квантования возможно появление шумов ограничения, когда амплитуда дискретизирующего сигнала превышает максимально возможный уровень квантования.

Таким образом, возникающие в процессе квантования ошибки (отличие амплитуд), равные разности амплитуд отсчета и квантованного сигнала, то есть $\xi=U_{кв}-U_с$, приводят к возникновению искажений, эти искажения на приемном конце создают помехи, накладывающиеся на сигнал и исчезающие

вместе с ним. Эти помехи называются шумами квантования. Максимально возможная ошибка квантования $\xi_{max}=\Delta U_к/2$ и называется шумом квантования.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что шум квантования является случайным процессом. При равномерном квантовании в интервале от $-\Delta U_к/2$ до $+\Delta U_к/2$ плотность распределения значений ошибки можно считать постоянной и равной $1/\Delta U_к$. Так как ошибка квантования, вероятностью равной единице, находится внутри интервала шириной $\Delta U_к$, поэтому можно считать, что средняя мощность ($P_{ш.к.}$) шума квантования определяется только шириной шага квантования $\Delta U_к$. Чем $\Delta U_к$ меньше, тем меньше средняя мощность шума квантования. $P_{ш.к.} =\Delta U_к/12$.

При квантовании возможно появление и шумов ограничения. Эти шумы возникают в тех случаях, когда амплитуда дискретизированного импульса превышает максимально возможный уровень квантования. Величина шумов ограничения при заданном значении максимального уровня квантования зависит только от уровня передаваемого сигнала и, следовательно, может быть уменьшена до любого требуемого значения соответствующим выбором величины этого уровня.

Числа, подлежащие передаче, надо записать в двоичной системе счисления – это и даст необходимые кодовые комбинации.

При помощи n - значных двоичных чисел можно представить 2^n чисел. Благодаря квантованию количество чисел, подлежащих передаче, сводится до конечной величины N. Если принять шаг квантования за единицу, то $N-1$ будет означать наибольшее квантованное значение.

Количество знаков в двоичной кодовой комбинации равно $n=\log_2 N$. Если n – не целое, то оно округляется до ближайшего целого числа. На рисунке 2.21 показаны преобразования аналогового сигнала (а) в АИМ (б) и ИКМ (в) для n = 4.

При выборе шага квантования (или числа N) следует учитывать два фактора. С одной стороны, увеличение числа ступеней квантования увеличивает точность передачи сигнала, с другой – требует удлинения кодовой комбинации (n). Так для телефонной передачи установлено, что удовлетворительное качество передачи достигается при $N\approx 100$, т.е. при семизначном коде.

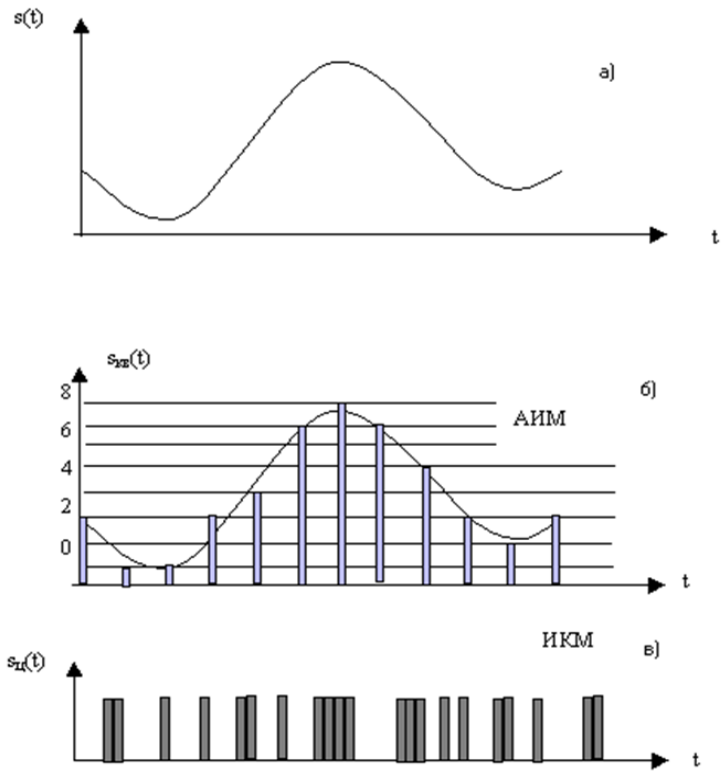


Рисунок 2.20 - Преобразования аналогового сигнала (а) в АИМ (б) и ИКМ (в) для n = 4

При выборе шага квантования (или числа N) следует учитывать два фактора. С одной стороны, увеличение числа ступеней квантования увеличивает точность передачи сигнала, с другой – требует удлинения кодовой комбинации (n). Так для телефонной передачи установлено, что удовлетворительное качество передачи достигается при $N \approx 100$, т.е. при семизначном коде.

При анализе приема сигналов с импульсно-кодовой модуляцией обычно рассматривают не отношение средних мощностей сигнала и помехи, а отношение половины шага квантования Δs (цена округления) к среднеквадратичному значению помехи $\sqrt{n^2} = \sqrt{P_n}$.

Квадрат отношения:

$$p = \frac{(0.5\Delta s)^2}{P_n}.$$

заменяет отношение сигнал – шум.

Допустим число уровней квантования равно N. Будем передавать каждое из N значений n - значным кодовым числом, составленным из импульсов, квантованных на m уровней (АИМ). Общее число возможных комбинаций равно m^n. Очевидно, что:

$$m^n = N,$$

если шкала уровней симметрична относительно нуля, т.е. разрешенными являются уровни:

$$\frac{-(m-1)}{2}\Delta s,\ldots-i\Delta s,\ldots,-2\Delta s,-\Delta s,0,\Delta s,2\Delta s\ldots\frac{(m-1)}{2}\Delta s.$$

Если все уровни равновероятны, средняя мощность сигнала равна:

$$P_c=\frac{\Delta s^2}{m}\sum_{i-\frac{-(m-1)}{2}}^{\frac{m-1}{2}}i^2=\frac{1}{12}\Delta s^2(m^2-1).$$

Отсюда шаг квантования равен:

$$\Delta s=\sqrt{\frac{12P_c}{m^2-1}},$$

где

$$p=\frac{3}{m^2-1};\frac{P_c}{P_n}=p_0.$$

Таким образом, при неизменных мощностях сигнала и помехи выгодно уменьшать основание кода. Наименьшее значение m равно 2 (двоичный код), что соответствует ИКМ. В этом случае $p=\frac{P_c}{P_n}$, т.е. введенная величина p совпадает с обычным определением отношения сигнал – помеха.

В обычной АИМ $N=m>>1$, и в этом случае:

$$p_N=\frac{3}{N^2}\cdot p_0.$$

Следовательно, ИКМ дает выигрыш в отношении сигнал – помеха в $\frac{N^2}{3}$ раз.

Каким образом достигается этот выигрыш.

Если при АИМ за каждый тактовый интервал (отсчет) передается один импульс, то при ИКМ за тот же интервал должны быть переданы n импульсов. При неизменной скважности каждый из этих n импульсов в n раз короче, а, следовательно, ширина спектра сигнала в n раз больше, чем ширина спектра сигнала АИМ.

Таким образом, за увеличение отношения сигнал – помеха мы расплачиваемся расширением полосы

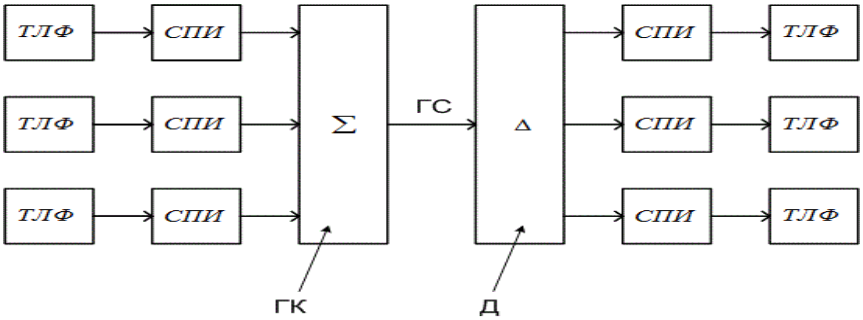
Достоинства: высокая помехоустойчивость; возможность регенерации ИКМ-сигнала; система менее чувствительна к нелинейным искажениям; удобство сопряжения с ЭВМ и АТС;

Выводы. Передаваемое сообщение дискретизируется по времени с помощью взятия выборок, затем выборки квантуются по уровням, отсюда весь динамический диапазон разбивается на дискретное число уровней, каждый из которых имеет собственное обозначение.

2.4 Многоканальная связь и методы разделения каналов

2.4.1 Многоканальная телефонная связь (МТС).

При обычной телефонной связи число одновременно действующих соединений должно быть меньше или равно числу предоставляемых каналов связи, а это удорожает строительство кабельных линий при большом числе абонентов. Выходом в этом случае является организация многоканальной связи на некоторых участках телефонной сети.



СПИ – система преобразования информации; ТЛФ – телефон; ГК – групповой канал; Д – делитель; ГС – групповой сигнал.

Рисунок 2.21 - Структурная схема многоканальной телефонной связи

Каналы тональной частоты ТА имеют диапазон 0,4 – 3,1 кГц и объединяются в групповой сигнал, которые занимают полосу частот N (3,1 кГц + защитный интервал). Защитный интервал примерно равен 0,3 кГц.

Преимущество многоканальной телефонной связи состоит в уменьшении затрат на прокладку линий связи, поскольку по одной паре проводов удается передать одновременно несколько разговоров. Полоса пропускания воздушной линии связи со стальными проводниками составляет 30 кГц, с медными – 150 кГц, для кабельных линий связи – 10 МГц, для коаксиального кабеля примерно – 1000 МГц.

Таблица 2.3 - Полоса пропускания

F-полоса пропускания	N_{max} (число каналов)
30 кГц	9
150 кГц	45
10 МГц	3000
1000 МГц	300000

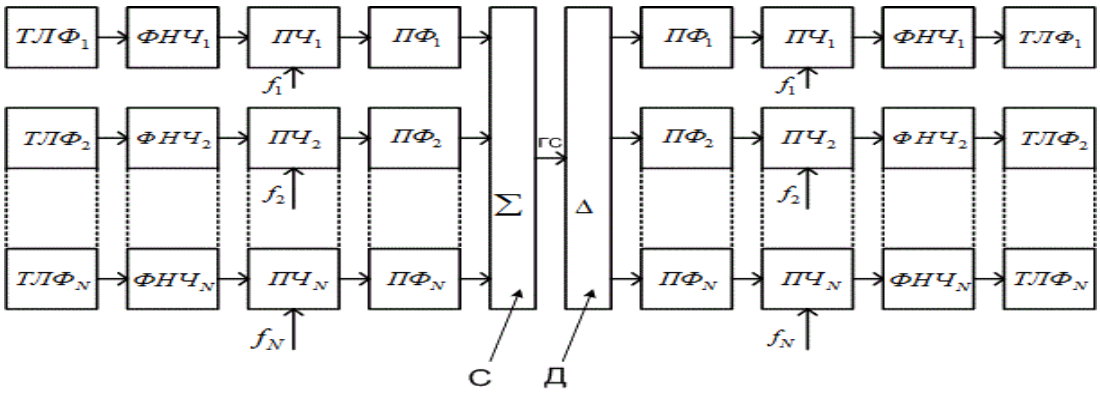
Реально используются следующие варианты по числу каналов:
- 1-й уровень – 12 телефонных каналов;
- 2-й уровень – 60 каналов;
- 3-й уровень – 300 каналов;

2.4.2 Методы разделения каналов.

1. Частотное разделение каналов (ЧРК) – FDMA.

Данный метод стоится с применением многоканальных фильтров и преобразователей частоты.

Преобразователь частоты с номером i производит амплитудную модуляцию с i-го телефонного аппарата, полосовым фильтром выделяется верхняя или нижняя боковые посолы амплитудно-модулированного сигнала. А в сумматоре происходит формирование группового сигнала. После передачи по общему каналу процесс обработки происходит в обратном направлении.



ПФ – полосовой фильтр; ПЧ – преобразователь частоты; ТЛФ – телефонный аппарат; С – сумматор.

Рисунок 2.23 - Структурная схема частотное разделение каналов (ЧРК) – FDMA с применением многоканальных фильтров и преобразователей частоты

2. Временное разделение каналов (ВРК) – TDMA.

При временном разделении каналов сигнал с каждого телефонного аппарата преобразуется в цифровую форму. При этом формируются пакеты данных, содержащие определенное число бит (*бит*– единица информации в цифровом виде). Сформированные пакеты для каждого телефонного канала передаются в специально отведенные временные слоты, которые делятся на временные каналы. Отдельные слоты разделены защитными временными интервалами.

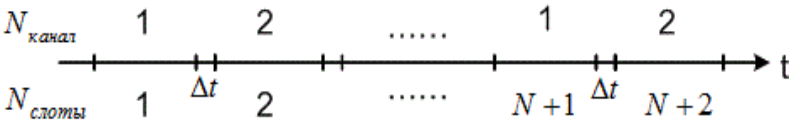


Рисунок 2.24 - Картина временного разделения каналов (ВРК) – TDMA

Принцип временного разделения каналов широко используется в современных системах передачи информации, поскольку позволяет сократить избыточность информации при сжатии данных цифровыми методами. Временное разделение каналов используется не только в проводных сетях общего пользования, но и в сотовых системах связи.

В современных системах многоканальной телефонной связи каждому телефонному каналу выделяется полоса частот 4 кГц, хотя частотный спектр передаваемых звуковых сигналов ограничивается полосой от 300 до 3400 Гц, т.е. ширина спектра составляет 3,1 кГц. Между полосами частот соседних каналов предусмотрены интервалы шириной по 0,9 кГц, предназначенные для снижения уровня взаимных помех при расфильтровке сигналов. Это означает, что в многоканальных системах связи с частотным разделением сигналов эффективно используется лишь около 80% полосы пропускания линии связи.

3 Многоканальные системы передачи

3.1 Принципы построения многоканальных систем передачи

Многоканальной системой передачи (в дальнейшем просто системой передачи) называется совокупность технических средств, обеспечивающих одновременную и независимую передачу однотипных или разнотипных сообщений от N источников к N получателям по одной линии связи (физической среде распространения сигналов электросвязи). Обобщенная структурная схема N – канальной системы передачи (СП).

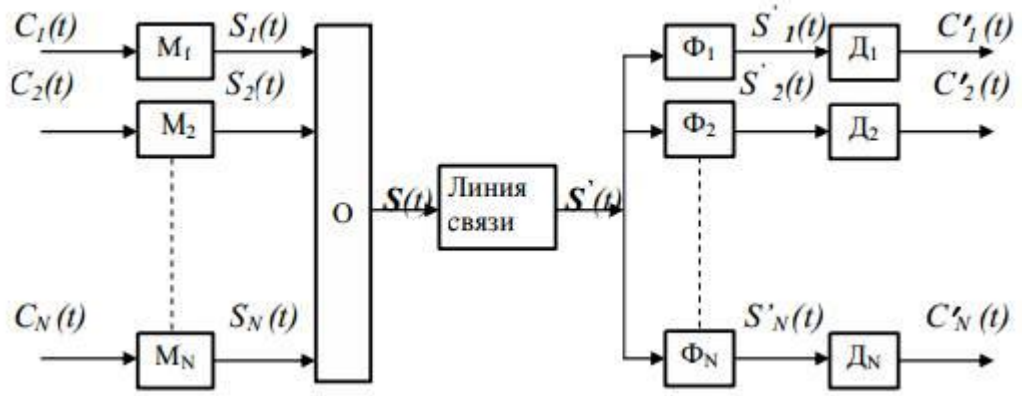


Рисунок 3.1 - Обобщенная структурная схема N – канальной системы передачи (СП)

Первичные сигналы $C_i(t)$, время существования и спектры частот которых могут частично или полностью перекрываться, поступают в передающую часть системы передачи, где с помощью устройств Mi преобразуются в канальные сигналы $S_i(t)$.

Каждый канальный сигнал $S_i(t)$ наделяется совокупностью физических признаков, отличающих его от остальных канальных сигналов эти признаки или параметры называются разделительными.

Необходимо сформировать канальные сигналы так, чтобы в них содержались сведения о форме первичных сигналов, поступающих на входы каналов.

Многоканальный или групповой сигнал $S(t)$ получается объединением канальных сигналов в устройстве объединения О. В частности групповой сигнал можно получить суммированием канальных сигналов, т.е.

$$S(t) = \sum_{i=1}^{N} S_i(t) \ . \qquad (3.1)$$

Системы передачи, где групповой сигнал представляет сумму канальных сигналов, называются аддитивными.

Системы передачи, в которых при формировании группового сигнала применяются другие операции, носят название комбинационных.

Разделение группового сигнала на отдельные канальные сигналы осуществляется разделяющими устройствами $Ф_i$(фильтрующими устройствами) на основе тех разделительных признаков, которыми первичные сигналы были наделены на передаче. На выходе устройств Фi получаем канальный сигнал S’i(t), отличающегося от канального сигнала Si(t) наличием помех и искажений, обусловленных прохождением канального сигнала по линии связи.

Разделяющие устройства Фi могут быть линейными и нелинейными. Система передачи называется линейной, или системой передачи с линейным разделением сигналов, если развязывающие устройства являются линейными четырехполюсниками с постоянными или переменными параметрами. Если разделяющие устройства представляют нелинейные четырехполюсники, то такие системы передачи называются нелинейными.

После разделения канальные сигналы поступают на устройства Дi, где осуществляется преобразование канальных сигналов S’i(t) в первичные сигналы С’i(t), отличающиеся от первичных сигналов на передачи наличием помех и искажений, вносимых средой распространения.

В многоканальных системах передачи, кроме внешних помех, возникают специфические помехи, обусловленные неидеальностью функционирования устройств разделения канальных сигналов. Эти помехи проявляются как взаимные переходные влияния между каналами.

Современные многоканальные системы передачи состоят из следующих основных частей: каналообразующего оборудования (КОО), оборудования сопряжения (ОС), Оборудования линейного тракта (ОЛТ), унифицированного генераторного оборудования (УГО) и сервисного оборудования (СО).

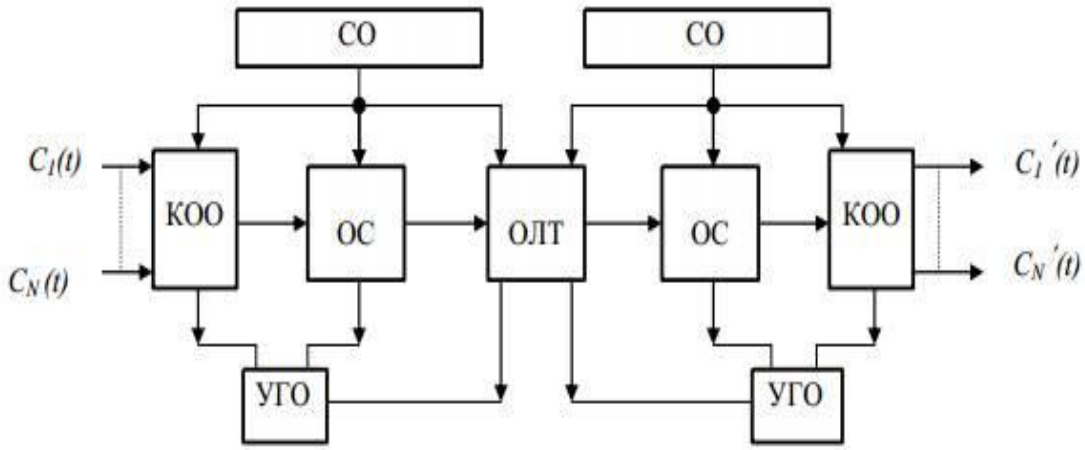


Рисунок 3.2 - Унифицированное оборудование многоканальных систем передачи

При построении многоканальных систем передачи наибольшее распространение получили временное и частотное разделение каналов на основе различных видов модуляции.

3.2 Основы построения систем передачи с временным разделением каналов (ВРК)

Метод ВРК применяется для передачи дискретных и аналоговых сигналов. Возможность передачи непрерывных периодических сигналов отдельными их значениями, взятыми в определенные моменты времени основывается на теореме В.А.Котельникова, согласно которой непрерывный сигнал с ограниченным спектром f определяется своими мгновенными значениями, взятыми через интервал времени, т.е. $T \leq 1/2f_{max}$.

За время цикла можно передать информацию нескольких каналов

Рисунок 3.3 – Схема цикла передачи

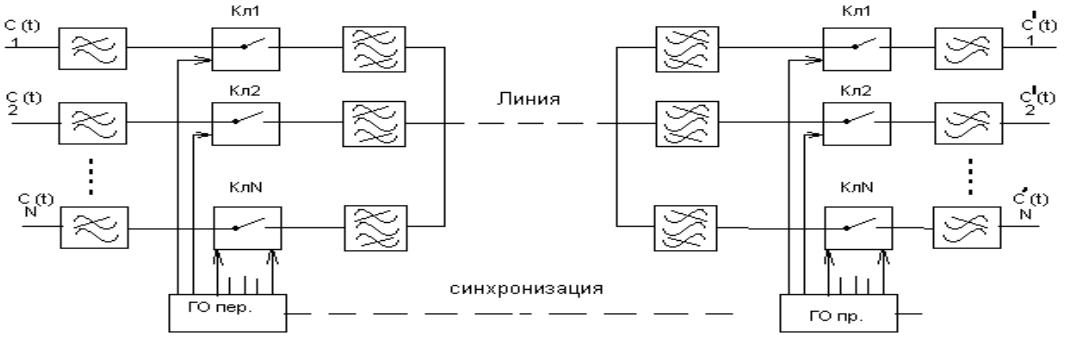


Рисунок 3.4 – Многоканальная система передачи с ВРК

При передаче информации с ВРК необходимо обеспечить синхронную работу генераторных оборудований (ГО) передающей и приемной станций.

Необходимо, чтобы ключи соответствующих каналов на приеме открывались в момент поступления импульсов данного канала.

Исходный сигнал C(t) пропускается через ФНЧ, чтобы ограничить его спектр. После сигнал подается на электронный ключ, замыкание которого осуществляется по сигналу с РИК, и данный канал на время длительности импульса подключается к линейному тракту (сети). И в результате кратковременного замыкания ключа получаем АИМ сигнал, промодулированный нашим сигналом.

Ключами других каналов управляет импульсная последовательность такой же частоты дискретизации $f_д$, но сдвинутая во времени относительно импульсной последовательности первого канала.

На приемной стороне приемника синхросигналов (ПрСС) выделяется этот импульс, и он подается на РИК. После электронного ключа (ЭКл) получается АИМ сигнал соответствующего канала. Помехозащищенность такой СП ВРК весьма низка, т.к. помеха изменяет амплитуду сигнала, непосредственно внося искажения. Поэтому для цепи повышенной помехозащищенности ВРК с АИМ в чистом виде не используется, а используются другие формы модуляции, то есть ШИМ и ФИМ.

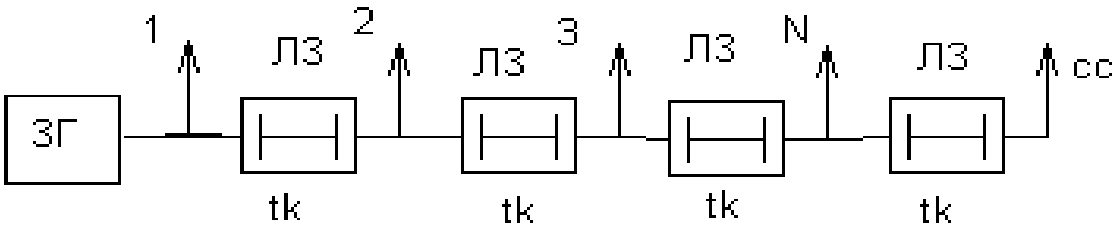


Рисунок 3.5 – Распределитель импульса каналов (РИК)

РИК организуется с помощью линии задержки. Основными элементами являются линии задержки (ЛЗ) с отводами. На приеме ключ соответствующих каналов должен работать синхронно с ключами передатчика. Для обеспечения синхронности в линию передается синхросигнал, т.е. импульс, по каким-то

параметрам отличающийся от импульса канального сигнала (информационный сигнал). Этот импульс формируется в формирователе СС и добавляется в цифровой тракт.

Принцип временного разделения каналов (ВРК) состоит в том, что групповой тракт предоставляется поочередно для передачи сигналов каждого канала многоканальной системы.

Поскольку передаваемые сигналы могут быть непрерывными аналоговыми и существовать одновременно, то необходимо представить их дискретными отсчетами в определенные моменты времени.

Решить данную проблему позволяет теорема Котельникова В.А., которая гласит, что всякий непрерывный аналоговый сигнал c(t), спектр которого ограничен сверху значением $F_{макс}$, может быть представлен последовательностью его мгновенных (дискретных) значений (отсчетов), следующих с частотой дискретизации Fд≥2 $F_{макс}$.

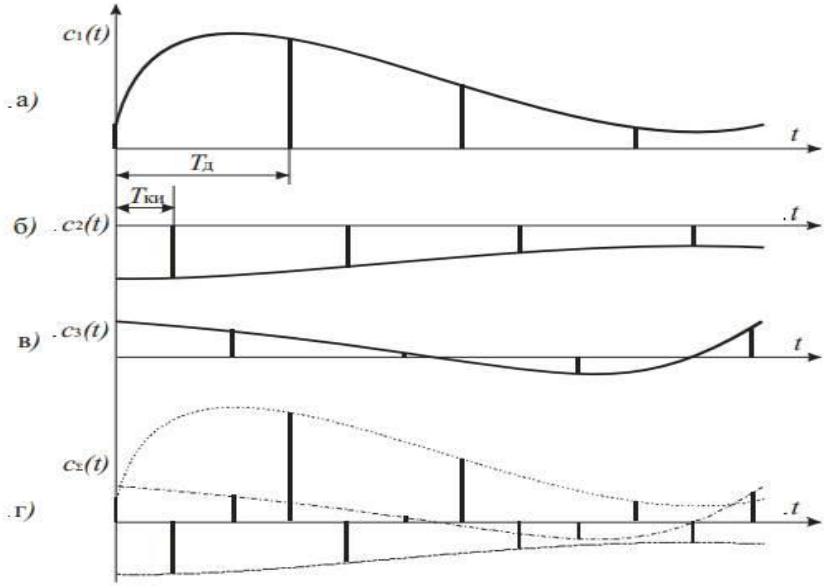


Рисунок 3.6 - Поочередная передача дискретных отсчетов первичных сигналов $c_1(t)$, $c_2(t)$, … $c_N(t)$

Следовательно, можно поочередно передавать дискретные отсчеты первичных сигналов $c_1(t)$, $c_2(t)$, … $c_N(t)$, когда сначала передается импульс 1-го канала, затем 2-го канала и т.д. до последнего N-го канала, после чего опять передается импульс 1-го канала и процесс повторяется с периодом $T_д = 1/F_д$.

Передаваемые отсчеты сдвинуты относительно друг друга на интервал времени $T_{ки} = T_д/N$, называемый канальным интервалом или тайм-слотом.

В примере число каналов системы передачи N=3, поэтому период дискретизации разделен на три части. Таким образом, импульсы (дискретные отсчеты) каждого индивидуального канала повторяются циклически через период дискретизации, поэтому $T_д$ также называется циклом передачи $T_ц$.

На приемной стороне дискретные отсчеты поочередно подключаются к соответствующим каналам, в которых импульсные сигналы преобразуются с помощью ФНЧ в непрерывные аналоговые сигналы $c_1'(t)$, $c_2'(t)$,… $c_i'(t)$,… $c_N'(t)$, которые отличаются от исходных $c_1(t)$, $c_2(t)$, … $c_i(t)$, … $c_N(t)$ из-за искажений при передаче и воздействия помех. Причем эти отличия не должны превышать допустимых значений.

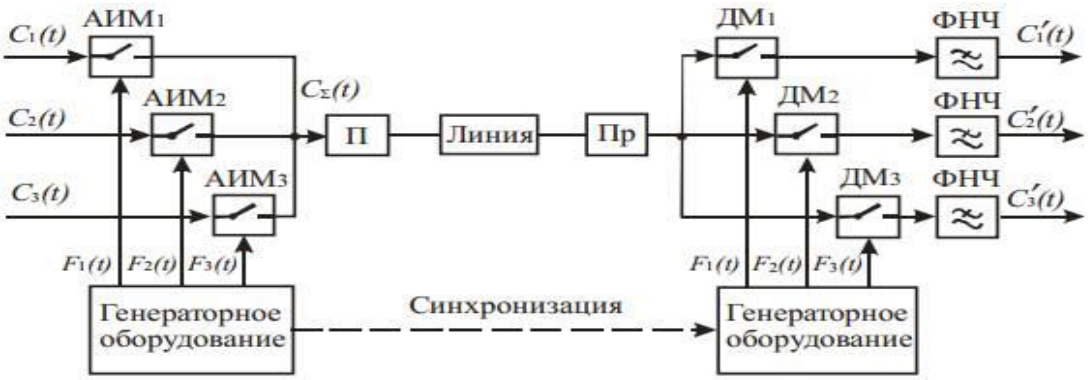


Рисунок 3.7 - Структурная схема многоканальной системы с ВРК

Ключевые элементы амплитудно-импульсных модуляторов АИМ1, АИМ2, АИМ3 поочередно замыкаются на время длительности канального интервала КИ-1, КИ-2, КИ-3, формируя импульсные сигналы $c_i(t)$ в каждом канале. Импульсы АИМ-сигналов разных каналов сдвинуты друг относительно друга по времени на длительность канального интервала. Синхронно с модуляторами в соответствующем канале замыкаются ключевые элементы демодуляторов $ДМ_1$, $ДМ_2$, $ДМ_3$.

Принятая последовательность амплитудно-модулированных импульсов в каждом канале поступает на соответствующий фильтр нижних частот ФНЧ, где формируется непрерывный аналоговый сигнал $c_{i'}(t)$. При объединении индивидуальных каналов в канале (линии) связи образуется групповой сигнал c(t) с частотой следования импульсов в N раз большей частоты следования индивидуальных импульсов.

Амплитудно-импульсные модуляторы могут работать в двух режимах: АИМ-1 и АИМ-2. При амплитудно-импульсной модуляции первого рода (АИМ-1) вершина импульса повторяет исходный модулирующий сигнал на длительности канального интервала. При амплитудно-импульсной модуляции второго рода (АИМ-2) амплитуда импульса равна начальному значению модулирующего сигнала и остается постоянной на всей длительности канального интервала.

Для каналов тональной частоты частота дискретизации выбирается равной $F_д$ = 8 кГц, следовательно, при передаче по каналу телефонного сигнала с полосой частот ΔF = 0,3…3,4 кГц полоса расфильтровки составит $\Delta F_р$ = (8 – 6,8) кГц = 1,2 кГц.

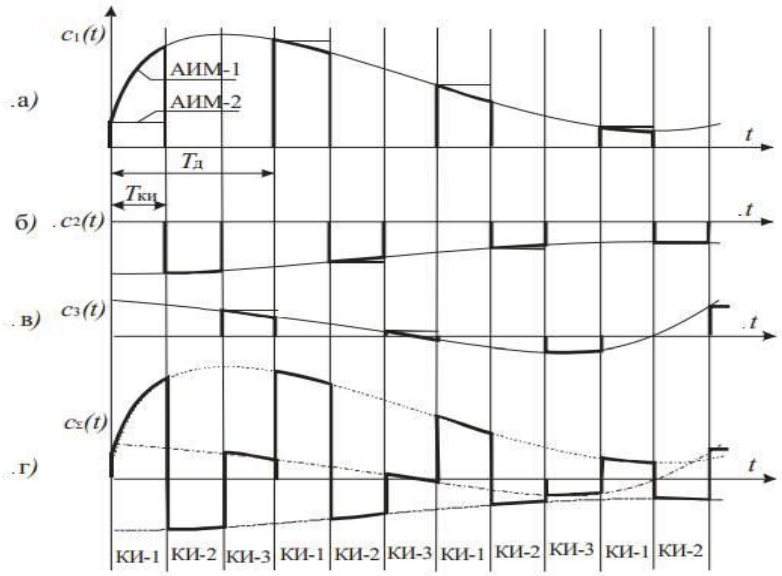


Рисунок 3.8 - Образование группового сигнала c(t)

При временном разделении существуют взаимные помехи, в основном обусловленные двумя причинами.

Первая состоит в том, что линейные искажения, возникающие за счет ограниченности полосы частот и неидеальности амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик всякой физически осуществимой системы связи, нарушают импульсный характер сигналов. При временном разделении сигналов это приведет к тому, что импульсы одного канала будут накладываться на импульсы других каналов. Иначе говоря, между каналами возникают взаимные переходные помехи или межсимвольная интерференция.

Кроме того, взаимные помехи могут возникать за счет несовершенства синхронизации тактовых импульсов на передающей и приемной сторонах.

В силу данных причин временное разделение каналов на основе АИМ не получило практического применения. Временное разделение широко используют в цифровых системах передачи плезиохронной и синхронной иерархий.

3.3 Телекоммуникационная система с частотным разделением каналов

Телекоммуникационная система с частотным разделением каналов -это система, в линейном тракте которой для передачи канальных сигналов отводятся неперекрывающиеся полосы частот.

Рассмотрим принцип частотного разделения каналов, используя схему N- канальной системы и планы частот в ее характерных точках.

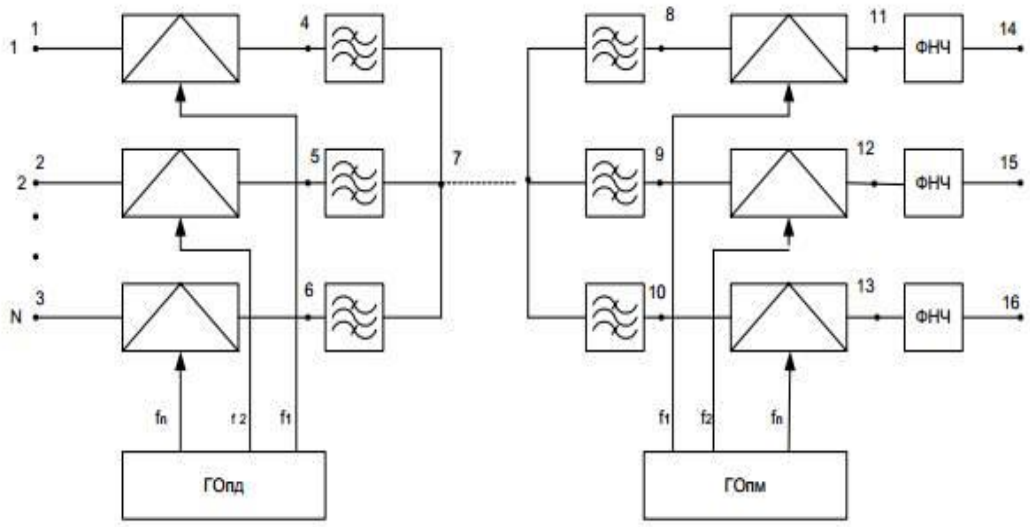


Рисунок 3.10 - Схема N- канальной системы и планы частот в ее характерных точках

ФНЧ подавляют высокочастотные паразитные продукты демодуляции.

Функциональная схема простейшей системы многоканальной связи с разделением каналов по частоте представлена на рисунке 3.11.

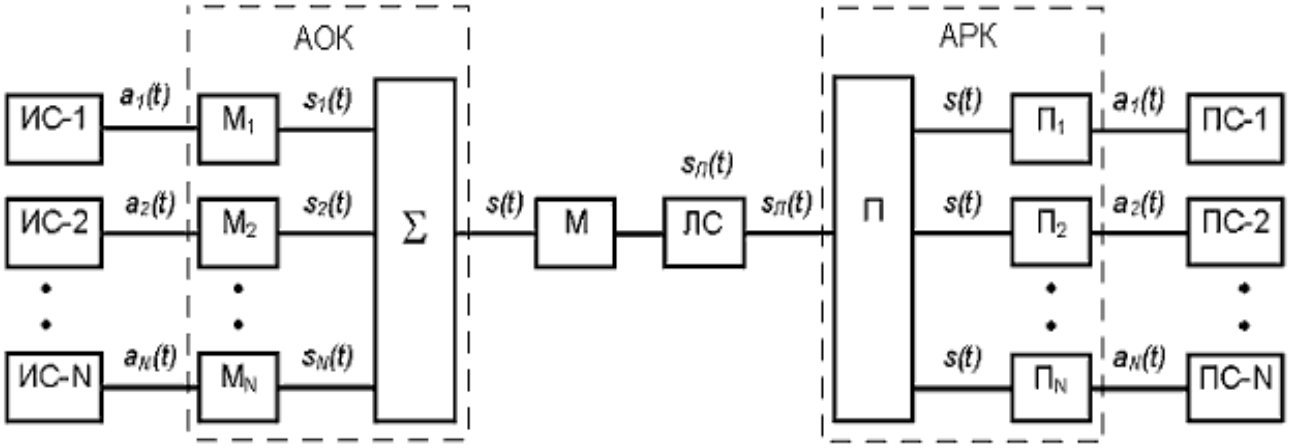


Рисунок 3.11 - Функциональная схема многоканальной системы с частотным разделением каналов

В зарубежных источниках для обозначения принципа частотного разделения каналов (ЧРК) используется термин Frequency Division Multiply Access (FDMA).Многоканальные системы передачи с частотным разделением каналов (СП с ЧРК) относятся к классу систем с линейным разделением сигналов с совпадающими или перекрывающимися спектрами.

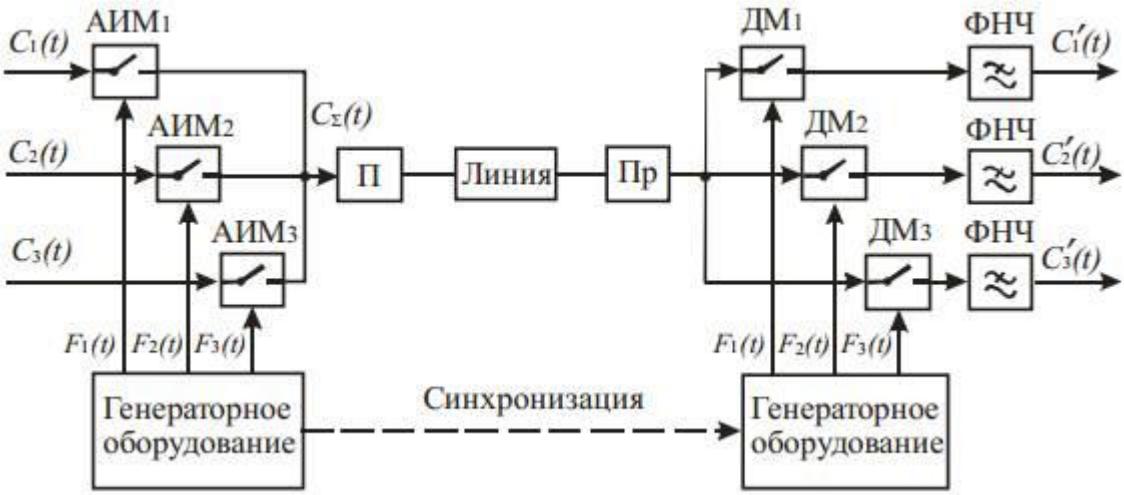
В качестве *переносчиков* канальных сигналов в СП с ЧРК используются *гармонические колебания различных частот,* а методами формирования канальных сигналов является *модуляция* одного или нескольких параметров

этих колебаний. Переносчики канальных сигналов называются несущими колебаниями, или *несущими частотами.*

Известно, что модуляция одного из параметров несущей частоты переносит спектр модулирующего сигнала в спектр частот, определяемый частотами несущего колебания и видом модуляции.

Сущность построения СП с ЧРК заключается в том, что спектр каждого первичного сигнала с помощью несущей частоты переносится в отведенную для него полосу частот линии связи (физической среды распространения электрического сигнала), формируя таким образом канальные сигналы с неперекрывающимися спектрами.

На вход канальных модуляторов M_1, M_2 и M_3 поступают первичные сигналы $c_1(t)$, $c_2(t)$ и $c_3(t)$, спектры которых S_1 (f), $S_2(f)$ и $S_3(f)$ занимают одну и ту же полосу частот $\Delta F_C = F_1 ... F_2$ (рисунок 3.12, *а).* С помощью несущих частот f_{H1}, f_{H2} и f_{H3}, представляющих гармонические колебания - переносчики $\Psi_1(t)$, $\Psi_2(t)$ и $\Psi_3(t)$, первичные сигналы преобразуются в канальные сигналы, занимающие полосы частот $f'_1 \ldots f''_1$ для первого канала, $f'_2 ... f''_2$ для второго и $f'_3 ... f''_3$ для третьего каналов (рисунок 3.12, б).



а)

Рисунок 3.12 - Структурная схема системы передачи с частотным разделением каналов

Канальные сигналы выделяются канальными полосовыми фильтрами (КПФ-1 для первого канала, КПФ-2 для второго канала и КПФ-3 для третьего канала). Спектр группового сигнала состоит из трех полос и занимает общий диапазон частот от f'_1 до f''_3 .

В приемной части происходит разделение канальных сигналов с помощью разделительных канальных полосовых фильтров КПФ-1 для первого канала, КПФ-2 для второго канала и КПФ-3 для третьего канала.

Спектральные диаграммы сигналов приемной части системы передачи с частотным разделением каналов приведены на рисунок 3.13.

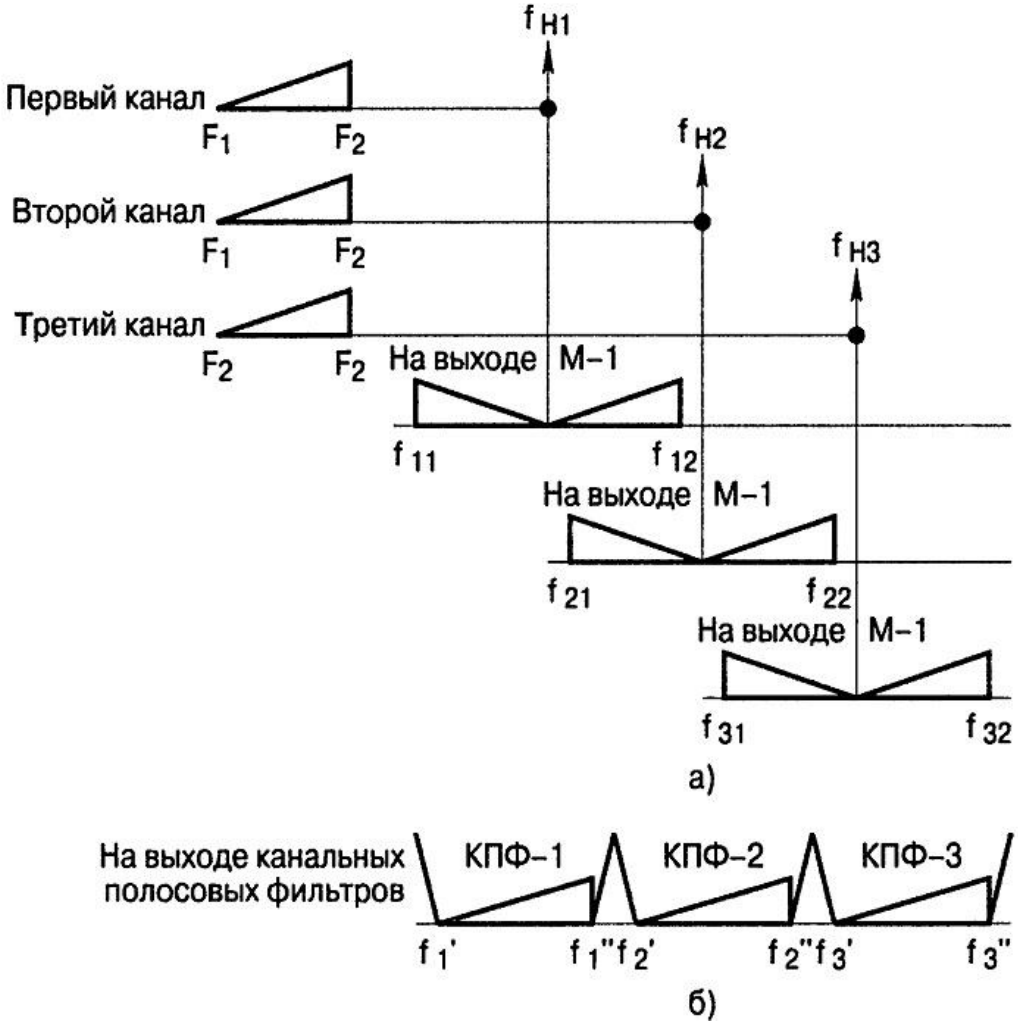


Рисунок 3.12 - Формирование канальных сигналов в системе передачи с частотным разделением каналов в передающей части тракта передачи

Выделенные канальные сигналы поступают на входы демодуляторов Д-1 первого канала, Д-2 второго канала и Д-3 третьего канала. На другие входы демодуляторов подаются несущие частоты f_{H1} первого канала, f_{H2}второго канала и f_{H3} третьего канала.

На выходе демодуляторов появляются первичные сигналы с полосой частот $\Delta F_C = F_1 ... F_2$ и высокочастотные продукты демодуляции (рисунок 3.13 б,в,г). Фильтры нижних частот (ФНЧ), устанавливаемые на выходе демодуляторов, выделяют полосу частот первичных сигналов ΔF_C и подавляют высокочастотные продукты демодуляции

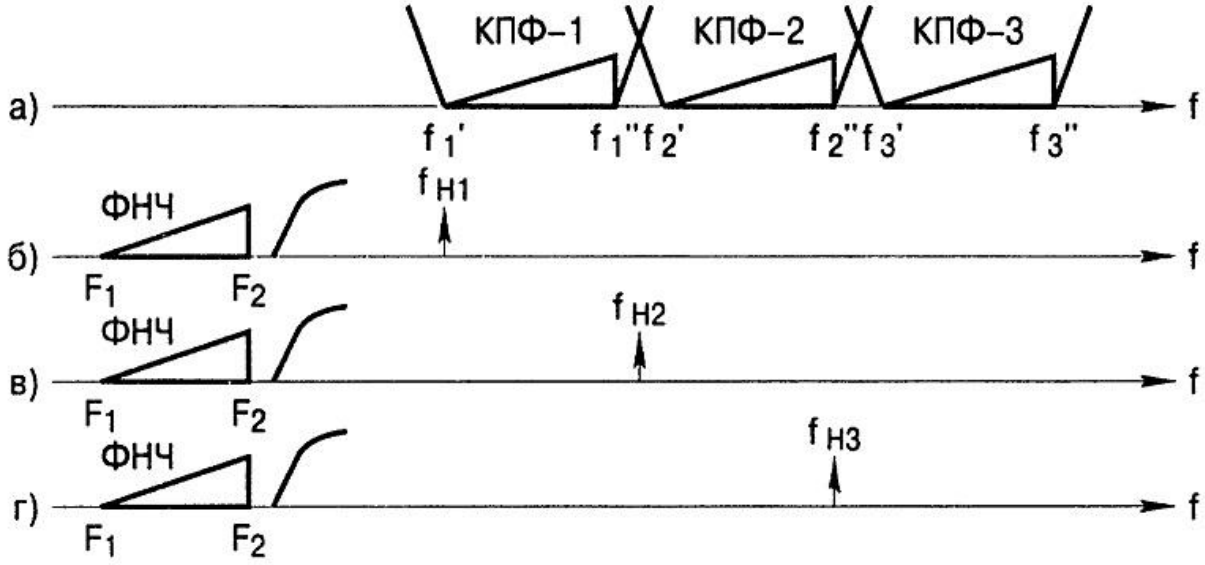


Рисунок 3.13 - Преобразование канальных сигналов в приемной части - тракте приема

Нетрудно показать, что сигналы на выходе канальных полосовых фильтров тракта передачи СП с ЧРК будут ортогональными в частотной области. Рассмотрим N-канальную систему передачи, спектр канальных сигналов которой приведен на рисунке 3.14.

Выбор способа формирования канальных сигналов имеет большое значение при построении СП с ЧРК.

3.4 Методы мультиплексирования и демультиплексирования сигналов

3.4.1 Методы мультиплексирования и демультиплексирования сигналов, основанные на частотном разделении.

Прежде чем выполнить переброску данных на определенные для них интерфейсы, коммутатор должен понять, к какому потоку они относятся. Эта задача должна решаться независимо от того, поступает ли на вход коммутатора только один поток в «чистом» виде, или «смешанный» поток, который объединяет в себе несколько потоков

В телекоммуникациях мультиплексирование подразумевает передачу данных по нескольким логическим каналам связи в одном физическом канале. Под физическим каналом подразумевается реальный канал со своей пропускной способностью - медный или оптический кабель, радиоканал

Задача мультиплексирования (multiplexing) - образование из нескольких отдельных потоков общего агрегированного потока, который можно передавать по одному физическому каналу связи.

Демультиплексирования (demultiplexing) - разделение суммарного агрегированного потока, поступающего на один интерфейс, на несколько составляющих потоков.

Чтобы определить, на какой интерфейс следует передать поступившие данные, коммутатор должен выяснить, к какому потоку они относятся. Эта задача должна решаться независимо от того, поступает на вход коммутатора только один «чистый» поток или «смешанный» поток.

Другими словами, мультиплексирование — это способ разделения одного имеющегося физического канала между несколькими одновременно протекающими сеансами связи между абонентами сети. Как уже было сказано, прежде чем выполнить переброску данных на определенные для них интерфейсы, коммутатор должен понять, к какому потоку они относятся. Эта задача должна решаться независимо от того, поступает ли на вход коммутатора только один поток в «чистом» виде, или «смешанный»,

поток, который объединяет в себе несколько потоков. В последнем случае к задаче распознавания добавляется задача демультиплексирования.

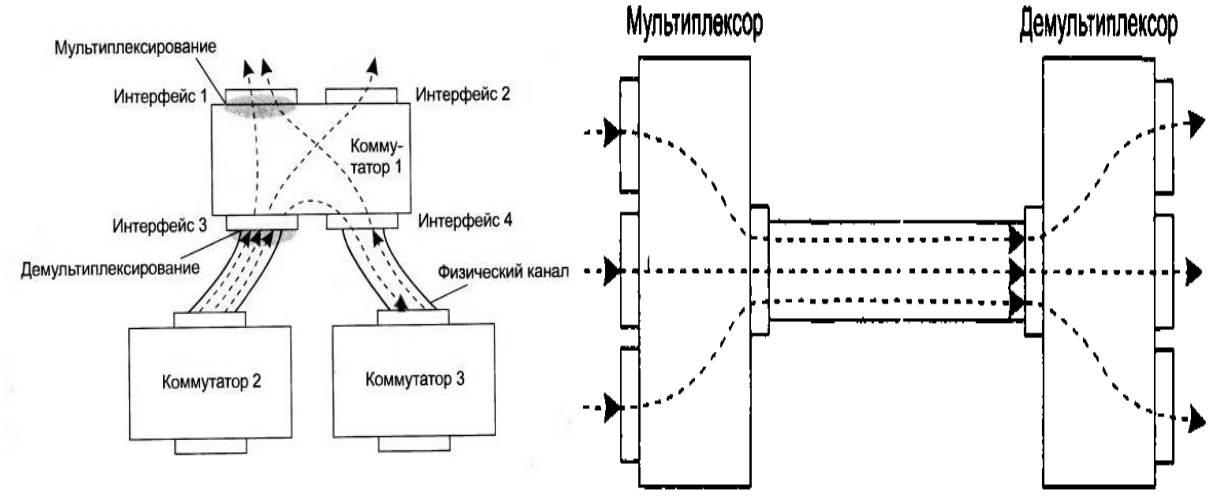


Рисунок 3.15 - Операции мультиплексирования и демультиплексирования потоков при коммутации

Задача демультиплексирования (demultiplexing) — раздел□ение суммарного *агрегированного потока*, поступающего на один интерфейс, на несколько составляющих *потоков*.

Задача демультиплексирования (demultiplexing) — раздел□ение суммарного *агрегированного потока*, поступающего на один интерфейс, на несколько составляющих *потоков*.

Как правило, операцию коммутации сопровождает также обратная операция — мультиплексирование.

Задача мультиплексирования (multiplexing) — образование из нескольких отдельных *потоков* общего агрегированного *потока*, который можно передавать по одному физическому каналу связи.

Операции мультиплексирования/демультиплексирования имеют такое же важное значение в любой сети, как и операции коммутации, потому что без них пришлось бы все коммутаторы связывать большим количеством

параллельных каналов, что свело бы на нет все преимущества неполносвязной сети.

Существует множество способов мультиплексирования *потоков* в одном физическом канале, и важнейшим из них является разделение времени. При этом способе каждый *поток* время от времени (с фиксированным или случайным периодом) получает в свое распоряжение физический канал и передает по нему данные. Очень распространено также частотное разделение канала, когда каждый *поток* передает данные в выделенном ему частотном диапазоне.

Технология мультиплексирования должна позволять получателю такого суммарного *потока* выполнять обратную операцию - разделение (демультиплексирование) данных на составляющие *потоки*.

3.4.2 Различные виды мультиплексирования.

Существует три основных метода мультиплексирования.

Виды мультиплексирования приведены на следующих рисунках 3.16 и 3.17.

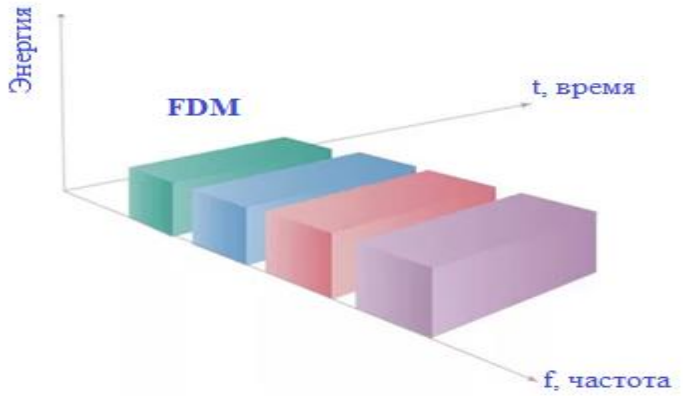


Рисунок 3.16 – FDM - Frequency Division Multiplexing

3.4.2.1 Мультиплексирование с разделением по частоте (FDM). Технология мультиплексирования с разделением по частоте (*FDM, Frequency Division Multiplexing*) предполагает размещение в пределах полосы пропускания канала нескольких каналов с меньшей шириной. Наглядным примером может послужить радиовещание, где в пределах одного канала (радиоэфира) размещено множество радиоканалов на разных частотах (в разных частотных полосах).

Используется в сетях мобильной связи для разделения доступа, в волоконно - оптической связи, аналогом которого является мультиплексирование с разделением по длине волны (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*), (где частота - это цвет излучения излучателя), в природе — все виды разделений по цвету (частота электромагнитных колебаний) и тону (частота звуковых колебаний).

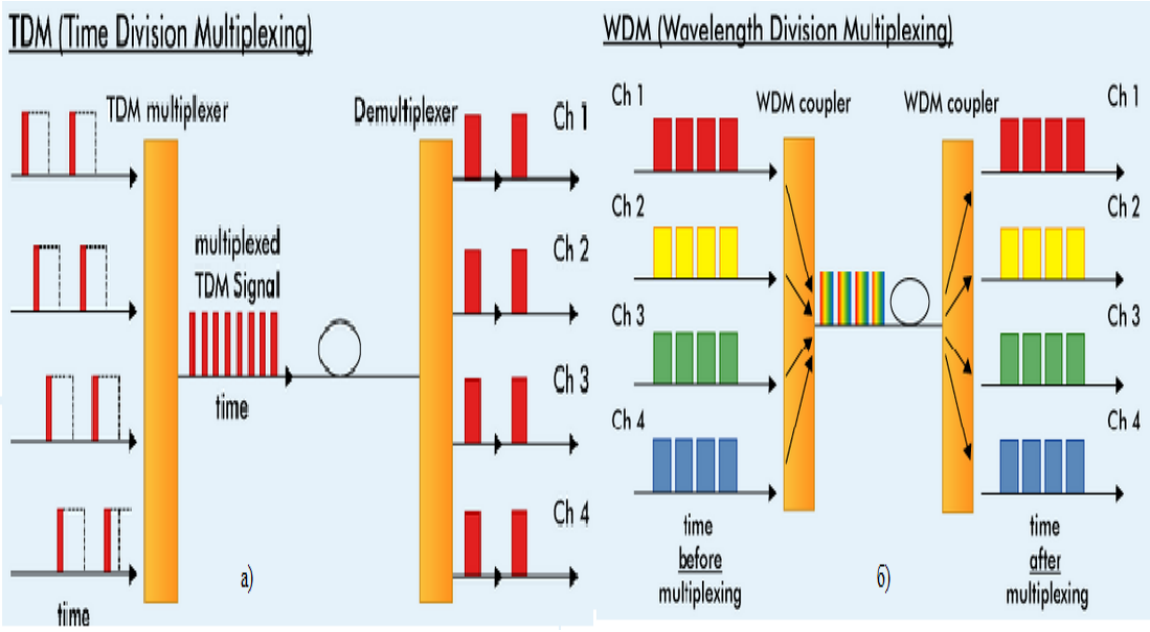


Рисунок 3. 17 - TDM, Time Division Multiplexing (а), WDM, Wavelength Division Multiplexing (б)

Как известно, человеческая речь может быть адекватно передана частотами в диапазоне от 300 до 3400 Гц, т.е. необходимый частотный интервал составляет 3100 Гц. Однако при мультиплексировании нескольких голосовых каналов каждому из них выделяется диапазон в 4000 Гц, чтобы они не перекрывались. Частота каждого канала увеличивается каждая на свою величину, кратную 4 кГц, затем каналы комбинируются. В результате каналы разносятся по всему спектру частот данной линии. Каналы отделены друг от друга так называемыми защитными интервалами.

При частотном мультиплексировании весь частотный диапазон разбивается на несколько каналов. Чтобы каналы не перекрывались, они отделены друг от друга защитными интервалами.

Схемы мультиплексирования FDM в достаточной мере стандартизованы. Наибольшее распространение получил стандарт, согласно которому двенадцать голосовых каналов шириной 4000 Гц мультиплексируются в диапазоне частот от 60 до 108 кГц. Такой блок называется группой. Диапазон с 12 до 60 кГц используется иногда для другой группы.

Разновидностью технологии частотного мультиплексирования, используемой в случае оптических линий связи, является мультиплексирование по длине волны (Wavelength Division Multiplexing, WDM). Физически мультиплексирование осуществляется следующим образом: несколько волокон подводится к призме (или чаще дифракционной решетке), световые пучки пропускаются через призму и попадают в общее волокно. На противоположном конце пучки разделяются с помощью другой призмы. Если каждый подводимый пучок ограничен своим частотным

диапазоном, то они не будут перекрываться. Оптические системы полностью пассивны и, как результат, более надежны.

3.4.2.2 Мультиплексирование с разделением по времени. TDM (англ. *TDM, Time Division Multiplexing*) предполагает кадровую передачу данных, при этом переход с каналов меньшей ширины (пропускной способности) на каналы с большей освобождает резерв для передачи в пределах одного кадра большего объёма нескольких кадров меньшего.

Рисунок 3.19 - Мультиплексирование с разделением по времени

На рисунке: A, B и C — мультиплексируемые каналы с пропускной способностью (шириной) N и длительностью кадра Δt; E — мультиплексированный канал с той же длительносью Δt но с шириной M×N, один кадр которого (*суперкадр*) несёт в себе все 3 кадра входных мультиплексируемых сигналов *последовательно*, каждому каналу отводится часть времени суперкадра — таймслот, длиной $\Delta t_M = \Delta t/M$.

Таким образом, канал с пропускной способностью M×N может пропускать M каналов с пропускной способностью N, причём при соблюдении канальной скорости (кадров в секунду) результат демультиплексирования совпадает с исходным потоком канала (A, B или C на рисунке) и по фазе, и по скорости, т. е. протекает незаметно для конечного получателя.

Основные применения:

- беспроводные TDMA-сети, Wi-Fi, WiMAX;
- канальная коммутация в PDH и SONET/SDH;
- пакетная коммутация в ATM, Frame Relay, Ethernet, FDDI;
- коммутация в телефонных сетях;
- последовательные шины: PCIe, USB.

При мультиплексировании с разделением по времени каждое устройство или входящий канал получают в свое распоряжение всю пропускную способность линии, но только на строго определенный

промежуток времени каждые 125 мкс. Последнее значение соответствует циклу дискретизации, так как при ИКМ каждую 1/8000 долю секунды необходимо производить измерение амплитуды аналогового сигнала. Время передачи восьмиразрядного значения мгновенной амплитуды называется квантом времени (time slot) и равно длительности передачи восьми импульсов (один для каждого бита). Последовательность квантов времени, следующих с вышеуказанным интервалом, образует временной канал. Совокупность каналов за один цикл дискретизации составляет кадр.

При временном мультиплексировании вся пропускная способность исходящей линии предоставляется на фиксированный промежуток времени входящей линии, меньшей емкости.

В Европе, как и в остальном мире, за исключением США и Японии, стандартной системой является ИКМ-32/30 (или Е-1) с 32 временными каналами по 64 кбит/с, в которой 30 каналов используются в качестве информационных для передачи голоса, данных и т. д., а два - в качестве служебных, причем один из служебных каналов предназначен для сигнализации (служебных сигналов установления связи), другой - для синхронизации. Как нетрудно подсчитать, общая емкость системы составляет 2,048 Мбит/с.

Система Е-1 образует так называемую первичную группу. Вторичную группу Е-2 образуют 4 канала Е-1 общей емкостью 8,448 Мбит/с, третичную систему Е-3 - четыре канала Е-2 (или шестнадцать каналов Е-1) общей емкостью 34,368 Мбит/с, а четверичную группу - четыре канала Е-3 общей емкостью 139,264 Мбит/с. Эти системы образуют европейскую плезиохронную цифровую иерархию.

Принцип последовательного мультиплексирования каналов проиллюстрирован на Рисунке 20. Четыре канала Е-1 мультиплексируются в один канал Е-2, причем на этом и последующих уровнях мультиплексирование осуществляется побитно, а не побайтно, как это имело место в случае мультиплексирования 30 голосовых каналов в один канал Е-1. Суммарная емкость четырех каналов Е-1 составляет 8,192 Мбит/с, в то время как полная емкость Е-2 равна в действительности 8,448 Мбит/с. Избыточные биты используются для обрамления и восстановления синхронизации. Затем четыре канала Е-2 мультиплексируются в один канал Е-3 и т. д.

Как малые притоки сливаются в одну большую реку, так и низкоскоростные линии объединяются в высокоскоростные с помощью иеархии мультиплексоров.

Принятый в Северной Америке и Японии, стандарт определяет канал Т-1 (формат кадра DS1). Канал Т-1 состоит из 24 мультиплексированных голосовых каналов, причем изначально предполагалось, что амплитуда аналогового сигнала будет выражаться 7-разрядным двоичным числом, а один бит использоваться для целей управления (сигнализации). Кроме того, помимо 192 бит каждый кадр имеет еще один бит для синхронизации. Таким образом, общая емкость канала Т-1 составляет 1,544 Мбит/с. Однако, в конце

концов, все 8 бит были отведены под данные, а сигнализация стала осуществляться одним из следующих двух способов. При сигнализации по общему каналу 193-й бит в каждом нечетном кадре служит для целей синхронизации, а в каждом четном - для сигнализации. Суть другого метода заключается в том, что каждый канал имеет свой собственный подканал для передачи сигнальной информации (один бит в каждом шестом кадре).

В последнее время, в использовании метода FDM мультиплексирования появился некий парадокс. Это связано, с одной стороны, что техника уплотнения аналоговых данных стала уступать технике уплотнения цифровых данных по TDM - технологии из-за своего существенного недостатка (появления шумов при наращивании усиления голосового сигнала).

А с другой стороны с использованием оптического волокна в качестве новой среды передачи данных явился на свет метод волнового уплотнения светового излучения (WDM). А волна и частота, как известно, – обратно пропорциональные параметры. Посему, частотное мультиплексирование логически «влилось» в волновое мультиплексирование.

3.4.2.3 Волновое мультиплексирование (WDM).

В последнее время заметного удешевления оптических каналов удалось достичь за счет мультиплексирования с делением по длине волны. Волновое мультиплексирование (WDM) технология передачи в системе в оптических системах, где различные источники используют разную длину волны. При этом два и более оптических сигналов объединяются и передаются по одному общему оптическому пути. Эта технология позволяет объединение передачи нескольких потоков данных по одному физическому волконно-оптическому кабелю.

Такое увеличение емкости кабеля достигается исходя из фундаментального принципа физики. Он состоит в том, что лучи света с разными длинами волн не взаимодействуют между собой. Основная идея систем WDM состоит в использовании нескольких длин волн (или частот) для передачи отдельного потока данных на каждой из них. Благодаря этому удалось в 16-160 раз увеличить широкополосность канала из расчета на одно волокно.

Путь развития способов мультиплексирования с разделением по длине волны шел по следующей схеме: WDM → DWDM → HDWDM → CWDM (таблица 3.1).

Настоящее время мультиплексирования с разделением по длине волны WDM - применяется в магистральных и зоновых сетях, а также для модернизации транспортных сетей ГТС.

Широкое применение оптического волокна в технологиях PON и FTTH с использованием волнового спектрального мультиплексирования в каналах ВОЛС привело к кардинальному прорыву в области построения актуальных

сетей передачи данных с высочайшей скоростью и небывалой пропускной способностью.

Таблица 3.1 - Путь развития способов мультиплексирования с разделением по длине волны

Номера этапов	Особенности
1-ый этап	2-х и 3-х канальное мультиплексирование (WDM).
2-ой этап	плотное мультиплексирование (DW M) до 88 каналов.
3-ий этап	высокоплотное мультиплексирование (HDWDM) до 256 каналов.
4-ый этап	разреженное мультиплексирование (CWDM) до 16 каналов.

3.4.2.4 Метод случайного доступа CSMA/CD.

Метод доступа, используемый в сетях Ethernet на разделяемой проводной среде, носит название CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection — прослушивание несущей частоты с множественным доступом и распознаванием коллизий).

Все компьютеры в сети на разделяемой среде имеют возможность немедленно (с учетом задержки распространения сигнала в физической среде) получить данные, которые любой из компьютеров начал передавать в общую среду. Говорят, что среда, к которой подключены все станции, работают в режиме коллективного доступа (Multiply Access, MA).

Чтобы получить возможность передавать кадр, интерфейс-отправитель должен убедится, что разделяемая среда свободна. Это достигается прослушиванием основной гармоники сигнала, которая еще называется несущей частотой (Carrier Sense, CS),

Признаком незанятости среды является отсутствие на ней несущей частоты.

Если среда свободна, то узел имеет право начать передачу кадра. В примере, показанном на рисунке 3. 21, узел 1 обнаружил, что среда свободна, и начал передавать свой кадр. В коаксиальном кабеле сигналы передатчика узла 1 распространяются в обе стороны, так что их получают все узлы сети. Кадр данных всегда сопровождается преамбулой, которая состоит из 7 байт, каждый из которых имеет значение 10101010, и 8-го байта, равного 10101011. Последний байт носит название ограничителя начала кадра. Преамбула нужна для вхождения приемника в побитовую и побайтовую синхронизацию с передатчиком. Наличие двух единиц, идущих подряд, говорит приемнику о том, что преамбула закончилась и следующий бит является началом кадра.

Все станции, подключенные к кабелю, начинают записывать байты передаваемого кадра в свои внутренние буферы. Первые 6 байт кадра содержат адрес назначения. Та станция, которая узнает собственный адрес в заголовке кадра, продолжает записывать его содержимое в свой внутренний

буфер, а остальные станции на этом прием кадра прекращают. Станция назначения обрабатывает полученные данные и передает их вверх по своему стеку. Кадр Ethernet содержит не только адрес назначения, но и адрес источника данных, поэтому станция-получатель знает, кому нужно послать ответ.

Рисунок 3.21 - Метод случайного доступа CSMA/CD

Узел 2 во время передачи кадра узлом 1 также пытался начать передачу своею кадра, однако обнаруживает, что среда занята — на ней присутствует несущая частота, — поэтому узел 2 вынужден ждать, пока узел 1 не прекратит передачу кадра.

После окончания передачи кадра все узлы сети обязаны выдержать технологическую паузу, равную межпакетному интервалу (Inter Packet. Gap, 1PG) в 9,6 мкс. Эта пауза нужна для приведения сетевых адаптеров в исходное состояние, а также для предотвращения монопольного захвата среды одной станцией. После окончания технологической паузы узлы имеют право начать передачу своего кадра, так как среда свободна. В приведенном примере узел 2 дождался окончания передачи кадра узлом 1, сделал паузу в 9,6 мкс и начал передачу своего кадра.

CDMA (англ. *Code Division Multiple Access* — множественный доступ с кодовым разделением) — технология связи, обычно радиосвязи, при которой каналы передачи имеют общую полосу частот, но разные ПСП. Наибольшую известность на бытовом уровне получила после появления сетей сотовой мобильной связи, её использующих, из-за чего часто ошибочно исключительно с ней (сотовой мобильной связью) и отождествляется.

В CDMA для каждого узла выделяется весь спектр частот и всё время. CDMA использует специальные коды для идентификации соединений. Каналы трафика при таком способе разделения среды создаются посредством применения широкополосного кодомодулированного

радиосигнала — шумоподобного сигнала, передаваемого в общий для других аналогичных передатчиков канал в едином широком частотном диапазоне. В результате работы нескольких передатчиков эфир в данном частотном диапазоне становится ещё более шумоподобным.

Каждый передатчик модулирует сигнал с применением присвоенного в данный момент каждому пользователю отдельного числового кода; приёмник, настроенный на аналогичный код, может вычленять из общей звука радиосигналов ту часть сигнала, которая предназначена данному приёмнику. В явном виде отсутствует временное или частотное разделение каналов, каждый абонент постоянно использует всю ширину канала, передавая сигнал в общий частотный диапазон, и принимая сигнал из общего частотного диапазона.

При этом широкополосные каналы приёма и передачи находятся на разных частотных диапазонах и не мешают друг другу. Полоса частот одного канала очень широка, вещание абонентов накладывается друг на друга, но, поскольку их коды модуляции сигнала отличаются, они могут быть дифференцированы аппаратно-программными средствами приёмника.

При кодовой модуляции применяется техника расширения спектра с множественным доступом. Она позволяет увеличить пропускную способность при неизменной мощности сигнала. Передаваемые данные комбинируются с более быстрым шумоподобным псевдослучайным сигналом с использованием операции побитового взаимоисключающего ИЛИ (XOR). На изображении ниже показан пример, демонстрирующий применение метода для генерации сигнала. Сигнал данных с длительностью импульса T_b комбинируется при помощи операции XOR с кодом сигнала, длительность импульса которого равна T_c (зам: ширина полосы пропускания пропорциональна 1/T , где T - время передачи одного бита), следовательно ширина полосы пропускания сигнала с данными равна $1/T_b$ и ширина полосы пропускания получаемого сигнала равна $1/T_c$. Так как T_c много меньше T_b , ширина полосы частот получаемого сигнала намного больше, чем таковая оригинального сигнала передаваемых данных.

Величина T_b/T_c называется фактором распространения или базой сигнала и определяет в известной мере верхний предел числа пользователей, поддерживаемых базовой станцией одновременно.

Как уже было сказано, прежде чем выполнить переброску данных на определенные для них интерфейсы, коммутатор должен понять, к какому *потоку* они относятся. Эта задача должна решаться независимо от того, поступает ли на вход коммутатора только один *поток* в "чистом" виде, или "смешанный" *поток*, который объединяет в себе несколько *потоков*. В последнем случае к задаче распознавания добавляется задача *демультиплексирования*.

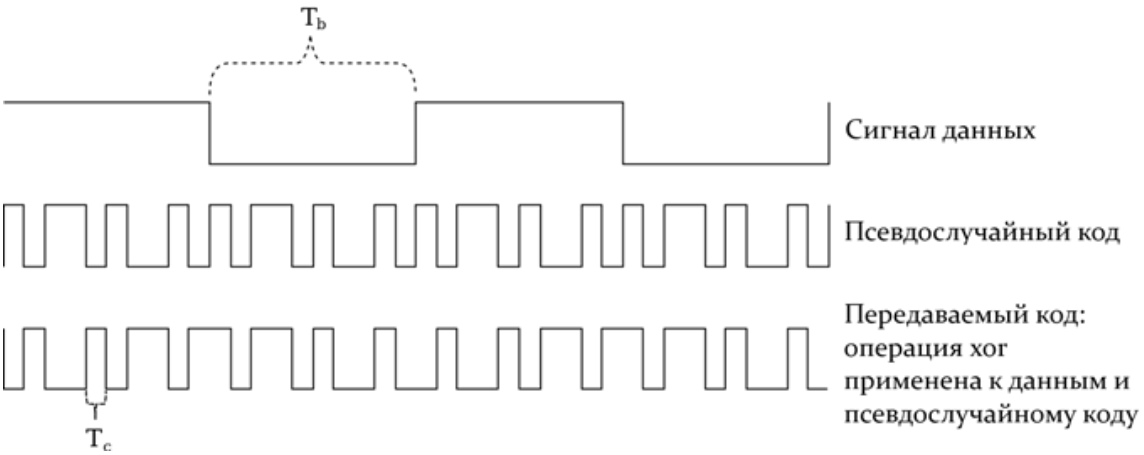


Рисунок 3.22 - Применение метода для генерации сигнала

3.5 Преобразование аналоговой информации в цифровую форму

При использовании ЭВМ для обработки информации от различных устройств (объектов, процессов), в которых информация представлена непрерывными (аналоговыми) сигналами, требуется преобразовать аналоговый сигнал в цифровой — в число, пропорциональное амплитуде этого сигнала, и наоборот.

В общем случае процедура аналого-цифрового преобразования состоит из трех этапов: дискретизации; квантования по уровню; кодирования. Под дискретизацией понимают преобразование функции непрерывного времени в функцию дискретного времени, а сам процесс дискретизации состоит в замене непрерывной функции ее отдельными значениями в фиксированные моменты времени.

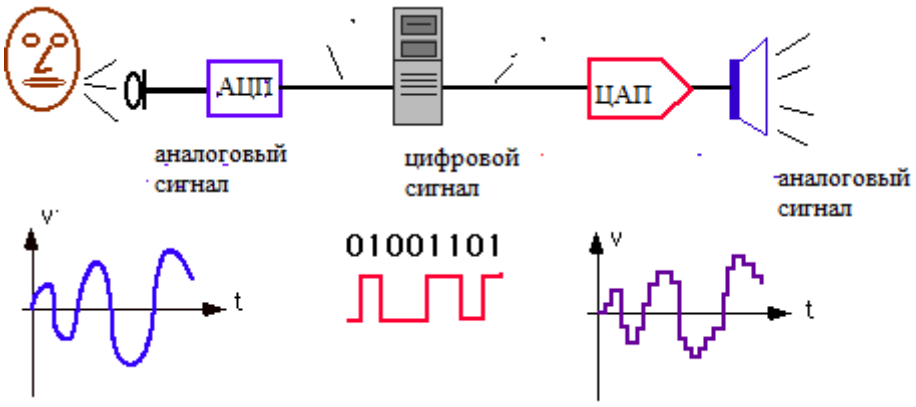


Рисунок 3.23 - Процесс аналого- цифрового преобразования

Дискретизация может быть равномерной и неравномерной. При неравномерной дискретизации длительность интервалов между отсчетами различна. Наиболее часто применяется равномерная дискретизации, при которой длительность интервала между отсчетами $T_д$ постоянна. Период

дискретизации Т непрерывного сигнала выбирается в соответствии с теоремой Котельникова:

$$T_Д = \frac{1}{2F_я}, \qquad (3.2)$$

где $F_я$ — высшая частота в спектре частот сигнала.

Под квантованием понимают преобразование некоторой величины с непрерывной шкалой значений в величину, имеющую дискретную шкалу значений. Для этого весь диапазон значений сигнала и (Ц, называемый шкалой, делится на равные части — кванты, Л — шаг квантования. Процесс квантования сводится к замене любого мгновенного значения одним из конечного множества разрешенных значений, называемых уровнями квантования. Вид сигнала и (3.1) в результате совместного проведения операций дискретизации и квантования.

Дискретизированное значение сигнала, находящееся между двумя уровнями квантования, отождествляется либо с ближайшим уровнем квантования, либо с ближайшим меньшим (или большим) уровнем квантования. Это приводит к ошибкам квантования, которые всегда меньше шага квантования (кванта), т. е. чем меньше шаг квантования, тем меньше погрешность квантования, но больше уровней квантования.

Для ускорения процесса преобразования, упрощения и удешевления преобразователя надо выбирать максимально допустимый шаг квантования, при котором погрешности еще не выходят за допустимые пределы. Можно провести нумерацию уровней и выразить их в двоичной системе счисления. Для восьми уровней достаточно трех двоичных разрядов. Каждое дискретное значение сигнала представляется в этом случае двоичным кодом (таблице 3.2) в виде последовательности сигналов двух уровней.

Таблица 3.2 Дискретные значения сигнала в виде последовательности сигналов двух уровней

Значение уровня	Двоичное представление значения уровня
6	011
5	101
4	001
5	101
6	011
7	111

Наличие или отсутствие импульса на определенном месте интерпретируется единицей или нолем в соответствующем разряде двоичного числа.

Таким образом, в результате дискретизации, квантования и кодирования аналогового сигнала получаем последовательность л-разрядных кодовых комбинаций, которые следуют с периодом дискретизации Г.

При этом рациональное выполнение операций дискретизации и квантования приводит к значительному экономическому эффекту как за счет снижения затрат на хранение и обработку получаемой информации, так и вследствие сокращения времени обработки информации. Рассмотрим в качестве примера аналого-цифровое преобразование речевого сигнала при использовании его в цифровых системах передачи.

Согласно рекомендациям Международного консультативного комитета по телефонии и телеграфии для передачи телефонных сообщений достаточна полоса частот от 300 до 3400 Гц, динамический диапазон — до 35 дБ. При этом слоговая разборчивость, определенная экспериментально, составляет 90%. Так как в реальном телефонном канале данная полоса частот выделяется фильтром, имеющим конечный спад частотной характеристики, в качестве расчетной ширины спектра стандартного телефонного канала используют ширину полосы частот в 4 кГц.

На практике преобразование аналогового сигнала в цифровую форму ос Схема простейшего АЦП представлена на рисунке 3.24. Она включает в себя суммирующий счетчик, ЦАП, сравнивающее устройство (К-компаратор) и генератор тактовых импульсов (ГТИ). По принципу действия такой АЦП называется последовательным. Временные диаграммы на рисунке 3.25 поясняют принцип его работы. На один вход компаратора поступает входной сигнал 17 . На другой — формируемое ЦАП напряжение порога срабатывания компаратора. При достижении равенства данного напряжения и напряжения входного сигнала на выходе компаратора появляется сигнал, останавливающий счет и суммирование тактовых импульсов в суммирующем счетчике. Одновременно считывается выходной цифровой код $x_д x_1..x_п$. Основной недостаток такой схемы — низкое быстродействие, так как время преобразования $T_{пр}$ пропорционально амплитуде:

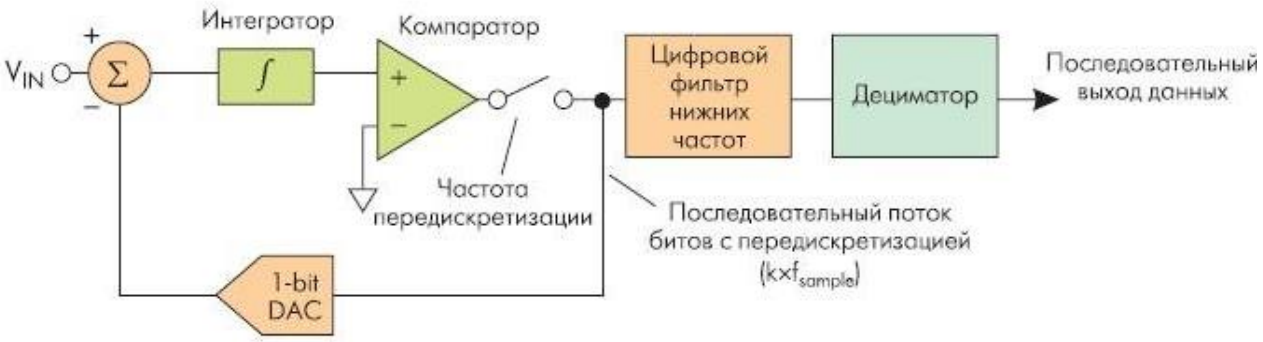


Рисунок 3.24 - Схема простейшего каскада АЦП

Значительно большим быстродействием отличаются АЦП параллельного кодирования. В них для преобразования аналогового сигнала в

п-разрядный двоичный код используется 2^{n1} компаратора. На один из двух дифференциальных входов каждого компаратора подается свое опорное напряжение, формируемое резисторным делителем. Разность между опорными напряжениями двух ближайших компараторов равна E/2, где E — опорное напряжение, соответствующее максимальному значению преобразуемого аналогового сигнала. Другие входы компараторов объединены, и на них подается входной сигнал. Приоритетный шифратор формирует выходной цифровой сигнал, соответствующий самому старшему сработавшему компаратору. Способ параллельного кодирования (иногда он называется способом мгновенного кодирования) отличается наибольшим быстродействием. Время задержки при передаче сигнала от входа к выходу равно сумме запаздываний компараторов и шифратора.

В некритичных к быстродействию применениях используют также преобразователи, построенные по методу двойного интегрирования. Такие преобразователи состоят из конденсатора (интегрирующий элемент), который в течение фиксированного промежутка времени заряжается током, пропорциональным входному сигналу, после чего он разряжается до тех пор, пока напряжение на нем не станет равным нолю. Время разряда конденсатора пропорционально значению входного сигнала и используется для подсчета тактовых импульсов фиксированной частоты при помощи счетчика. Полученное число, пропорциональное входному уровню, является выходным цифровым сигналом.

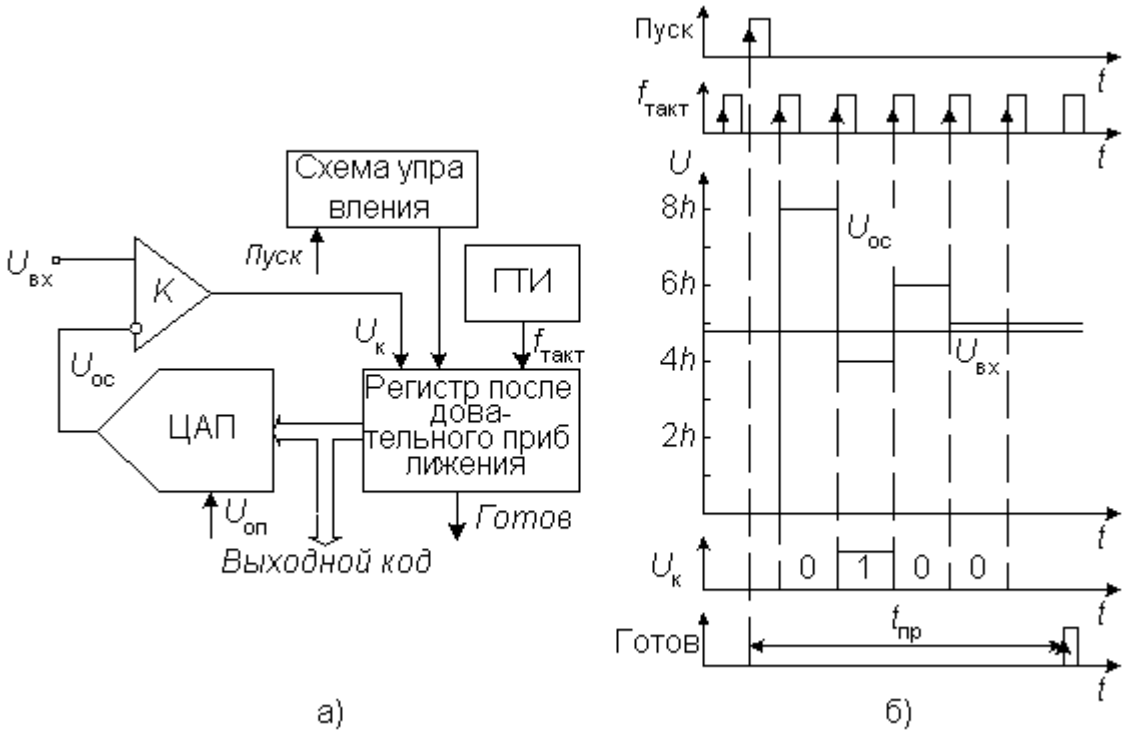


Рисунок 3.25 – Структурная схема и временные диаграммы работы АЦП последовательного приближения

Устройство, осуществляющее преобразование изменяющейся во времени аналоговой величины в соответствующие значения числовых кодов, называется аналого-цифровым преобразователем.

Преобразование осуществляется через определенный интервал времени А, определяемый необходимой частотой дискретизации входного аналогового сигнала в конкретной цифровой системе. Количественная связь между аналоговой величиной *S* и соответствующей ей величиной выходного эффекта $5_Ц$, который будет переводиться в цифровой сигнал, имеет вид

$$S_ц = \frac{(S - \delta S)}{\Delta S}\ , \qquad (3.3)$$

где ΔS - шаг квантования;

S - погрешность преобразования на данном шаге.

Современные АЦП выполняются таким образом, что операции дискретизации, квантования и кодирования практически совмещаются. Поэтому параметры АЦП существенно влияют на характеристики цифровых устройств обработки. Структурно схему АЦП можно изобразить, как на рисунке 3.26.

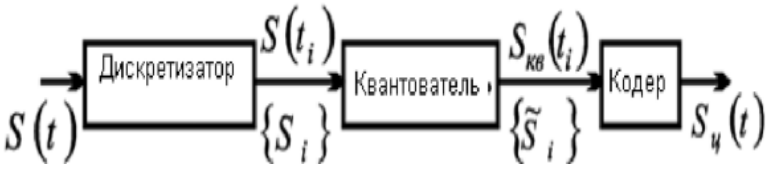


Рисунок 3. 26 - Структурная схема АЦП

К основным параметрам АЦП относятся:

- динамический диапазон;
- частота дискретизации $/_д$, интервал дискретизации А;
- время преобразования; разрешающая способность; погрешность преобразования.

Динамический диапазон АЦП определяется отношением максимального сигнала к среднеквадратичному значению шумов квантования.

Для идеального m-разрядного АЦП с нормализованным к единице максимальным значением динамический диапазон, выраженный в децибелах:

$$D_{ДБ} = \frac{u_{\max}}{\sigma_{кв}} = 10\lg 12(2^m - 1)^2 .$$

Частота преобразования (дискретизации) $/_д$ - это частота, с которой происходит образование выборочных значений сигнала. Она определяет требование к быстродействию АЦП и должна выбираться в соответствии с соображениями, рассмотренными выше.

Время преобразования t - это время от начала импульса дискретизации (начала преобразования) до появления на выходе АЦП устойчивого кода,

соответствующего выборке входного сигнала. При работе без устройств выборки и запоминания оно является так называемым апертурным временем и определяет достижимую частоту дискретизации. Апертурное время t_a - это время, в течение которого сохраняется неопределенность между значением выборки и моментом времени, к которому она относится. Оно характеризует апертурную погрешность, под которой понимают амплитудную погрешность, равную приращению сигнала в течение времени t :

$$\Delta u_a(t_n) \approx u'(t_n) t_a .$$

Обычно для оценки этой погрешности используют синусоидальный измерительный сигнал $u\{t) = u_m \sin cot$, для которого максимальное относительное значение апертурной погрешности равно:

$$\frac{\Delta u_a}{\Delta u_m} = \omega t_a .$$

Если принять, что для m-разрядного АЦП с разрешением 2^mпогрешность не должна превышать шага квантования, то между частотой сигнала co, апертурным временем t_a и относительной апертурной погрешностью имеет место соотношение:

$$\omega_a^t = 2^{-m} .$$

Разрешающая способность - это способность АЦП различать два значения входного сигнала. Определяется количеством различных кодовых комбинаций на выходе АЦП и выражается либо в битах (число разрядов), либо как относительный динамический диапазон в децибелах.

Погрешность преобразования обусловлена эффектом квантования и отличием реальной характеристики квантования от идеальной. В качестве меры ее оценки может служить мощность шумов квантования и мощность шумов ограничения реальных АЦП.

Следует отметить, что параметры АЦП взаимосвязаны друг с другом и являются результатом компромисса между различными противоречивыми требованиями: точностью и быстродействием, точностью и сложностью, быстродействием и стоимостью. Этим объясняется и большое многообразие практических схем АЦП.

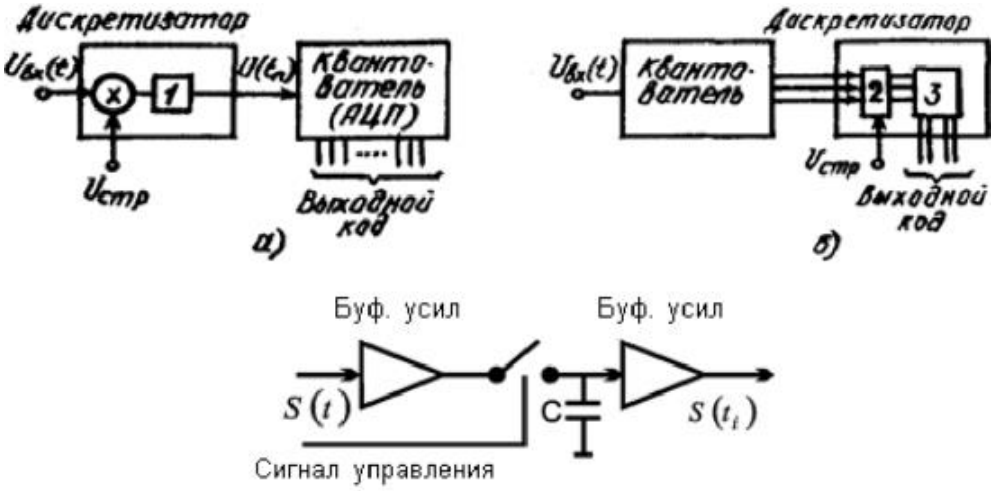
Таким образом, дискретизация с помощью самого АЦП приводит к существенному (до двух-трех порядков) расхождению требований между быстродействием и периодом дискретизации. В этом случае даже для сравнительно узкополосных сигналов требуются быстродействующие АЦП. Расхождение устраняют применением перед АЦП устройств выборки и запоминания аналогового или цифрового типа.

Структурные схемы таких устройств приведены на рисунках 3.27 а, 3.27 б и 3.27 в соответственно. Наибольшее применение находят аналоговые устройства выборки и запоминания, представляющие собой комбинацию накопительных конденсаторов, быстродействующих аналоговых ключей и усилительных каскадов. Время, в течение которого образуются выборочные значения напряжения на накопительном элементе, называемое временем выборки, равно длительности импульсов дискретизации.

Дискретизатор (его еще называют *устройство выборки и хранения* или сокращенно *УВХ)* обеспечивает выборку мгновенного значения входного сигнала и хранение этого значения заданное время с требуемой точностью.

В качестве запоминающего элемента в УВХ используется конденсатор.

Например, УВХ можно реализовать так, как показано на рисунке 3. 27.



а,в - аналогового типа; б- цифрового типа; (1- накопительный элемент; 2- схема логического стробирования; 3- цифровая схема выработки кода).

Рисунок 3. 27- Схема дискретизатора (УВХ)

В общем случае структурная схема УВХ приведена на рисунке 3.28.

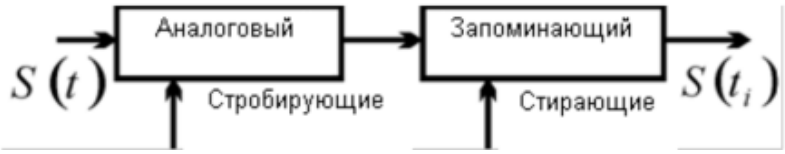


Рисунок 3. 28 - Обобщенная структурная схема дискретизатора (УВХ)

Наибольшее распространение в цифровых системах получили два типа УВХ. В УВХ первого типа при подаче стробирующего импульса на управляющий вход аналогового ключа происходит заряд конденсатора с малой постоянной времени до напряжения входной смеси.

С окончанием стробирующего импульса входной сигнал отключают от запоминающего элемента (конденсатора), который фиксирует напряжение,

равное уровню входного сигнала в момент окончания стробирующего импульса. К этому моменту времени и относят отсчет. В промежутке между стробирующими импульсами УВХ сохраняет значение предыдущего отсчета.

Ко второму типу относят интегрирующие УВХ, в которых производят интегрирование входного сигнала в течение воздействия стробирующего импульса и хранение результата интегрирования в промежутке между этими импульсами. Здесь отсчет относят к середине интервала стробирования. В конце каждого периода дискретизации производят стирание информации (при разряде конденсатора).

Чаще используют интегрирующие УВХ из-за их большего динамического диапазона и лучшей фильтрации.

В *квантователе* полученные на предыдущем этапе дискретные отсчеты мгновенных значений входного сигнала квантуются по уровню. *Кодер* выполняет преобразование дискретных квантованных отсчетов в двоичные кодовые комбинации. Здесь m - основание кода, например, для двоичного кода $m = 2$.

Такое аналого-цифровое преобразование сигнала называется *импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ).*

Чаще всего кодирование здесь сводится к записи номера уровня квантования в двоичной системе счисления.

По способу преобразования АЦП разделяют на последовательные, параллельные и последовательно-параллельные.

Прежде чем оцифровывать аналоговый сигнал, необходимо убедиться, что он содержит только частоты, непосредственно относящиеся к измерению, и что все посторонние или нежелательные частотные составляющие, например высокочастотные шумы, исключены или подавлены. Для этой цели используются аналоговые фильтры.

Для извлечения из сигнала полезной информации после АЦ-преобразования используются цифровые фильтры. С помошью цифровой фильтрации можно уменьшить посторонние составляющие входного сигнала. Чтобы обеспечить качество и правильность измерительной информации, после АЦ-преобразования необходимо провести ряд предварительных проверок.

Сигнал, выработанный датчиком, должен быть отфильтрован от всех посторонних частот до того, как он будет обработан компьютером. В частности необходимо устранить высокочастотный шум, который обычно наводится в кабеле при передаче сигнала. Отфильтрованные измерительные сигналы собираются в мультиплексоре. Это устройство, которое имеет несколько входов и 1 выход .Преобразование аналогового сигнала в цифровой происходит в АЦП - аналогово-цифровом преобразователе (ADC).

Схема выборки и хранения (*sample-and-hold*) запоминает мгновенные значения входного сигнала в заранее установленные моменты времени и удерживает его постоянным на выходе в течение интервала дискретизации.

Во многих системах различные элементы системы должны совместно использовать некоторые ограниченные ресурсы, например входной порт компьютера или длинный сигнальный кабель, по которому передаётся информация от нескольких датчиков. Мультиплексирование (*multiplexing*) позволяет компьютеру в любой момент времени выбирать, сигнал какого датчика необходимо считать. Иначе говоря, мультиплексор (*multiplexer*) можно рассматривать как переключатель (коммутатор), соединяющий компьютер в каждый момент времени только с одним датчиком (рисунок 3.29).

Если считать, что все выходы мультиплексора пронумерованы, то переключение обычно происходит последовательно в соответсвии с порядковым номером, однако применяются и другие алгоритмы. Токовые утечки и скачки напряжения на входах мультиплексора могут представлять собой серьёзную проблему. Развязывающий усилитель между датчиком и компьютером работает с дифференциальным входом, но потенциал сигнала может «плавать» относительно «земли». В этом случае проводники, подходящие к мультиплексору или АЦП, должны быть гальванически изолир ованы.

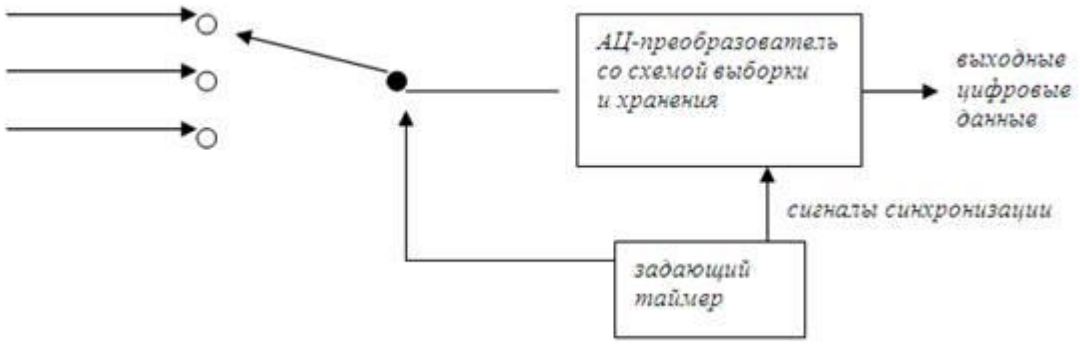


Рисунок 3.29 – Мультиплексирование и АЦ-преобразование измерительной информации

4 Дискретизация сигналов. Аналого - цифровое преобразование. Цифро-аналоговое преобразование. Методы коммутации в каналах связи

Дискретизация (*sampling*) - выборка, оцифровка, квантование - представляет собой считывание сигнала только в определённые моменты времени; этот процесс реализуется в компьютере специальной схемой. Дискретизация включает мультиплексирование и АЦ-преобразование. Эти операции должны быть строго синхронизированы с помощью задающего таймера (рисунок 4.1).

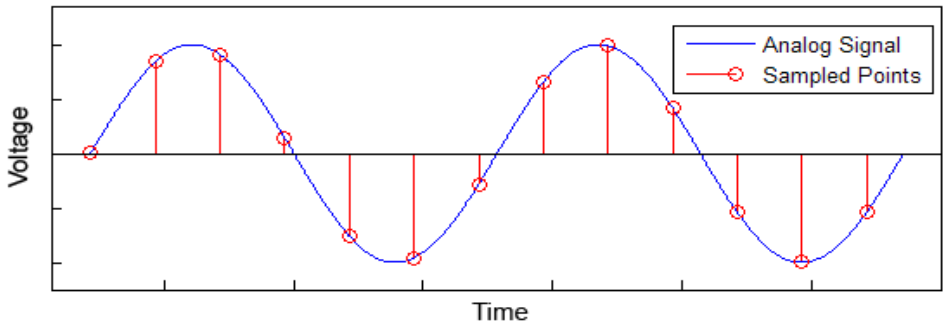


Рисунок 4.1- Синхронизация сигнала с помощью задающего таймера

Сама по себе дискретизация происходит очень быстро. Однако во время АЦ-преобразования не должно быть каких-либо изменений во входном сигнале которые могли бы повлиять на цифровой выход. Это обеспечивается операцией выборки и хранения (*sample-and-hold*). В каждом цикле дискретизации значение аналогового сигнала считывается в начале каждого интервала и остаётся постоянным в течение всего времени АЦ-преобразования. Эта операция называется задержкой нулевого порядка (рисунок 4.2).

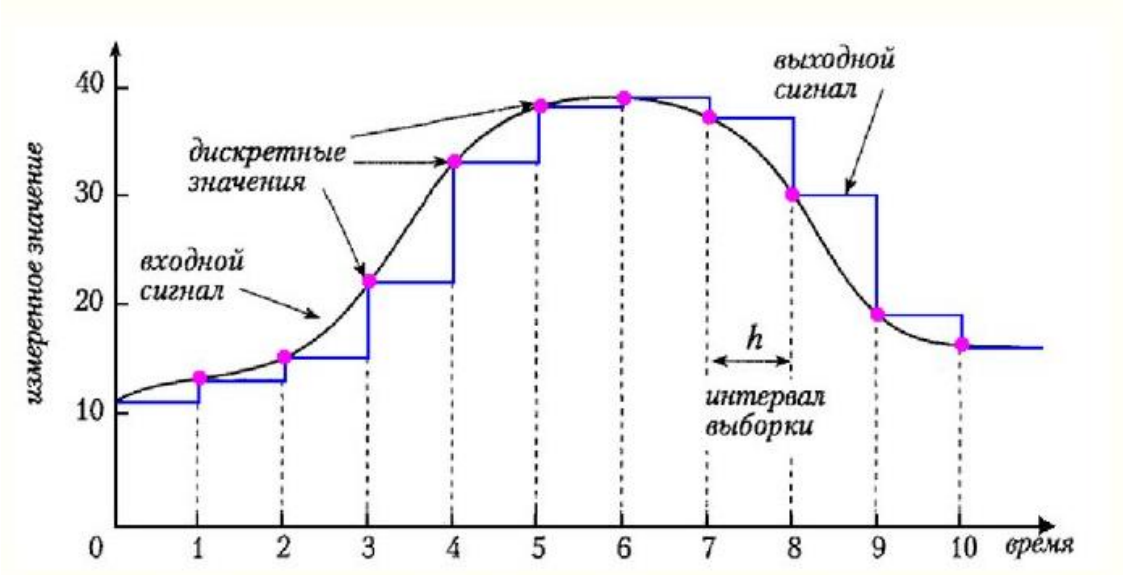


Рисунок 4.2 - Дискретизация аналогового сигнала с задержкой нулевого порядка

4.1 Схема выборки и хранения. Определение интервала дискретизации. Схемы аналого-цифрового преобразования

Схема выборки и хранения приведена на рисунке 4.3. Её работа управляется ключом. В моменты выборки (*S-sample*) ключ замыкается и конденсатор *C* заряжается до текущего значения напряжения входного сигнала.

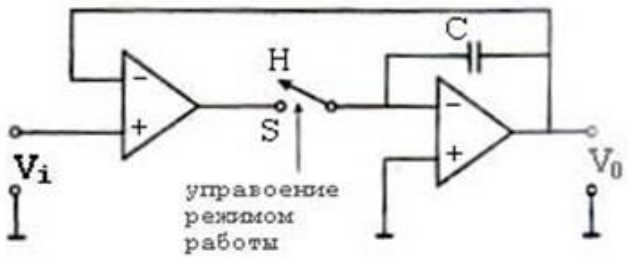


Рисунок 4.3 - Схема выборки и хранения с единичным усилителем

Во время процесса *(H-Hold)* ключ открыт и на выходе операционного усилителя сигнал в идеальном случае остаётся постоянным. Он равен последнему выходному значению в момент, когда ключ был ещё замкнут.

В режиме S амплитуда выходного сигнала равна мгновенному значению входного сигнала $V_0 = V_i$. В режиме удержания H выходной сигнал постоянен и равен последнему выходному значению, когда цепь функционировала в режиме выборки.

Дискретный сигнал отстаёт примерно на половину интервала дискретизации относительно непрерывного сигнала. Если процедура дискретизации является частью большой системы управления, эта задержка может вызвать фазовое отставание и привести к сокращению диапазона устойчивости цифрового регулятора по сравнению с соответствующим устройством.

Очень важно правильно определить интервал дискретизации аналогового сигнала. Интервал дискретизации должен быть достаточно коротким, чтобы выходной сигнал с приемлемой точностью описывал изменения аналогового входа. Теоретическая частота дискретизации должна более, чем в два раза превышать частоту наивысшей составляющей преобразуемого сигнала.

Если интервал дискретизации слишком велик, т. е частота выборки слишком мала, то компьютер получит неверную картину исходного сигнала. В то же время слишком малый интервал, выполняет неоправданно много вычислений. Кроме того, чем больше быстродействие, тем дороже устройство. Поскольку после выборки об исходном сигнале ничего не известно до следующей выборки, период дискретизации должен быть настолько коротким, чтобы исходный сигнал не успел значительно измениться.

Другими словами, частота выборки должна быть достаточной для последующего восстановления аналогового сигнала из дискретного.

Для компьютерной обработки дискретные аналоговые значения измерительно сигнала необходимо представить в цифровой форме, т. е выполнить аналого-цифровое преобразование. Соответствующее устройство

называется аналого-цифровым преобразователем АЦП. АЦП генерирует двоичное слово - цифровой выход - на основе аналогового сигнала.

АЦП может работать в соответствии с различными принципами; два широко распространённых метода - параллельное сравнение и пошаговое приближение.

В АЦП, работающем по принципу сравнения, входное напряжение сравнивается с различными уровнями напряжения, выработанными на основе известного опорного напряжения и каскада сопротивлений (Рис.6). На выходе каждой схемы сравнения - компаратора - появляется 0 или 1 в зависимости от соотношения входного и опорного напряжений. Выход каждого компаратора затем преобразуются в двоичный код.

АЦП, работающий по принципу пошагового приближения построен на основе ЦАП. Диапазон входного сигнала разделён на 2n-1 интервалов, где n - чсило бит в выходном слове. Счетчик быстро генерирует последовательные числа, которые сразу преобразуются в аналоговые значения. Счётчик продолжает наращивать выход до тех пор, пока разница напряжений между выходомами АЦП и входным значением не станет меньше разрешённой способности АЦП . Преобразование на с основе пошагового приближения требует определённого времени, которое зависит от времени ЦАП - преобразования и от входного значения. Вообще говоря, время ЦА-преобразования находится в наносекундном диапазоне, а для типового АЦП это время составляет от 0,5 до 400 мкс.

Разрешение преобразования обычно составляет 10-12 бит, т. е 1023 либо 4095 интервалов по напряжению; следовательно, входной сигнал квантуется в соответствующих долях от полной входной величины. Часть характеристики АЦП определены так же, как для ЦАП, - разрешение, нулевое смешение, линейность и время преобразования.

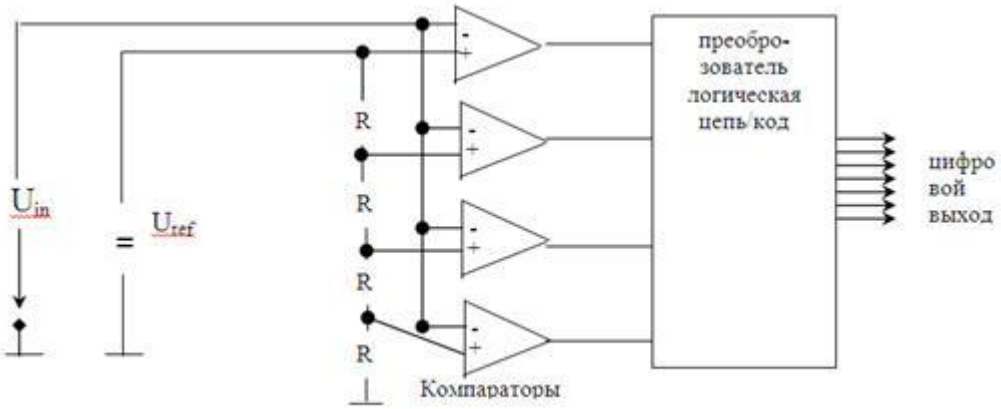


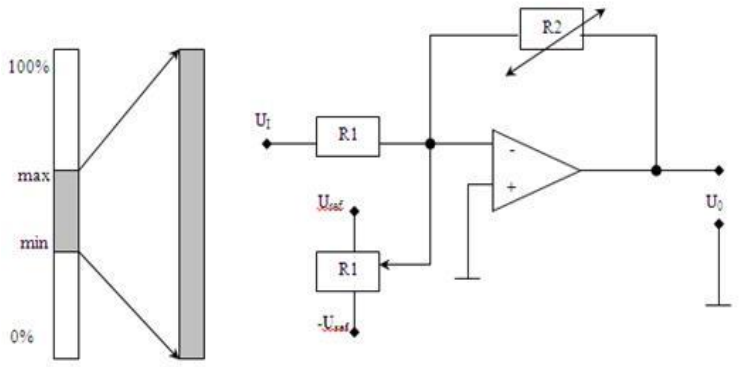
Рисунок 4.4 - АЦП с параллельными схемами сравнения

При работе АЦП важно, чтобы его разрешающая способность использовалась полностью.

На практике редко бывает так, что преобразуемый входной сигнал (выход датчика) изменяется от 0 – 100% всего своего диапазона. Обычно нормальным является изменение в пределах 5% от его теоретического диапазона и поступает 10-битный АЦП. Тогда действительный входной диапазон сигнала будет составлять 5% от 1023 или около 50 интервалов напряжения.

Таким образом, цифровое разрешение будет определяться около 1/50 частью всего диапазона, т. е. 2% (рисунок 4.5, а). Если вместо этого АЦП можно настроить на 0 при 20% и на 1023 при 5% входного сигнала, то разрешение становится намного выше – 1/1023 или 0,1% диапазона датчика. Для того, чтобы использовать весь диапазон АЦП, нужно подстраивать как коэффициент усиления, так и смещение напряжения входного аналогового сигнала. Это можно сделать с помощью операционного усилителя (рисунок 4.5б). Смещение напряжения настраивается переменным резистором R1 так, чтобы выход усилителя постоянного тока соответствовал минимуму входного сигнала АЦП, который в свою очередь соответствует минимальному значению измерительного сигнала. Переменный резистор R2 используется для настройки усилителя так, чтобы выходной уровень усилителя для максимума входного измерительного сигнала соответствовал максимальному значению АЦП.

Если для передачи сигналов используется диапазон 4-20 мА, то разрыв цепи можно обнаружить как сигнал 0 мА. АЦП можно использовать также для индикации нерабочего состояния датчика. Если АЦП откалиброван так, что максимальный входной сигнал соответствует значению 4000 вместо 4095 в 12-битовом АЦП, то большие значения выходного слова можно использовать для индикации исключительных и ошибочных ситуаций. Это, однако, требует некоторых дополнительных электронных схем и средств обработки.



а) б)

АЦП –0-100% настройка смещения нуля резистором R1 (а) и коэффициента усиления резистором R2 (б).

Рисунок 4.5 - Использование всего диапазона

Основные понятия и элементы:

- ИНС- источник непрерывных сообщений (a(t)-некоторое колебание);
- АЦП- аналого-цифровой преобразователь:

1) Временная дискретизация.

Теоретической основой временной дискретизации является (теорема Котельникова - любой непрерывный сигнал S(t) с ограниченным спектром можно точно восстановить по его отсчетам , взятым через интервал времени

$$\Delta t = \frac{1}{(2F)},$$

где F – верхняя частота спектра сигнала.

2) Квантование по уровню (Никакой аналоговый сигнал нельзя точно представить).

3) Примитивное кодирование (В АЦП современных системах связи применяют эффективное кодирование(сжатие данных) + помехоустойчивое кодирование;- М Модулятор:

1) ГНК-Генератор несущего колебания.

2) Модулятор-устройство с двумя входами и одним выходом.

3) На первый вход подается сообщение.

4) На второй вход ВЧ переносчик, несущее колебание на выходе - модулированный сигнал.

Модуляция – процесс изменения одного или нескольких параметров высокочастотного переносчика по закону передаваемого низкочастотного сигнала;

- демодуляция - процесс выделения низкочастотного сообщения из высокочастотного сигнала;
- РУ - решающее устройство.

4.2 Цифро-аналоговое преобразование

Для решения обратной задачи преобразования числа в пропорциональную аналоговую величину, представленную в виде электрического напряжения, тока и т. п. служит цифроаналоговый преобразователь (ЦАП).

В ЦАП каждая двоичная кодовая комбинация преобразуется в аналоговый сигнал и на выходе создается последовательность модулированных по амплитуде им- пульсов с периодом Т . Восстановление аналоговой структуры производится при помощи специальных схем, обеспечивающих фильтрацию либо экстраполяцию этих сигналов. В основе построения ЦАП лежит принцип суперпозиции токов (напряжений), каждый из которых пропорционален шагу квантования.

При этом член суммы не равен 0, если соответствующий разряд входного слова равен 1.

На рисунке 4.6 представлена одна из наиболее простых схем ЦАП, включающая:

- источник опорного напряжения (ИОН), Е;
- аналоговые ключи (АК);
- цепи формирования выходных сигналов (резистивные цепи).

На вход ЦАП поступает п-разрядный код преобразуемого числа X. Состояние электронного ключа определяется значением соответствующего разряда преобразуемого числа, при этом, если двоичный разряд числа равен единице, то соответствующий резистор соединяется с источником опорного напряжения Е, в противном случае ключ разомкнут.

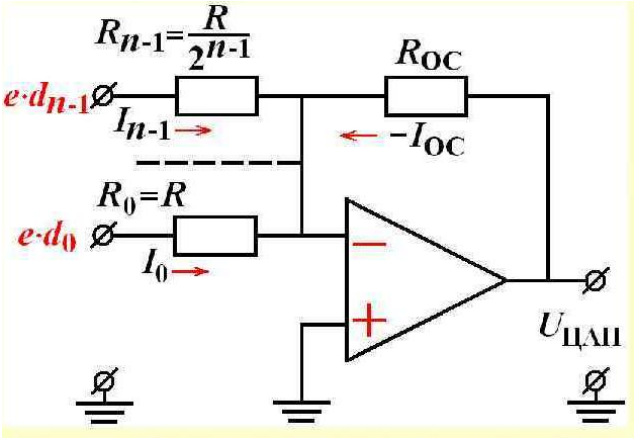


Рисунок 4.6 - Цифроаналоговый преобразователь с весовыми резисторами

Сопротивления резисторов подбирают следующим образом:

$$R_0 = 2^{\circ} R;$$
$$R_1 = 2^1 R;$$
$$\ldots$$
$$R_{n\cdot 1} = 2^{n\cdot 1} R\ldots$$

При этом на выходе ЦАП для каждого кода имеем:

$$I_{вых} = \sum_{i=0}^{n-1} I_i = \frac{E}{2^{n-1} R} \sum_{i=0}^{n-1} x_i 2\,,$$

где х — значение /-го разряда входного двоичного кода.

Точность такого преобразования определяется разрядностью ЦАП, а также точностью изготовления резисторов и стабильностью опорного напряжения Е. Для уменьшения количества номиналов резисторов используют цепную схему, составленную из вдвое большего числа резисторов всего лишь двух номиналов — Л и 2Я. Цифроаналоговые преобразователи могут преобразовывать в аналоговый сигнал лишь параллельные коды. При

преобразовании в аналоговый сигнал последовательных кодов их сначала преобразуют в параллельные.

Для получения аналогового сигнала из цифрового используется цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), представляющий собой устройство для декодирования входного числового кода в соответствующее ему значение выходного напряжения или тока. Количественная связь между входной цифровой величиной $U_ц$ и ее аналоговым эквивалентом U для ЦАП имеет вид: $U = U_U \Delta U$, где ΔU - шаг квантования.

Преобразование в ЦАП должно заканчиваться за время, много меньшее интервала между сменами числовых кодов на входе ЦАП. Структурная схема ЦАП приведена на рисунке 4.7.

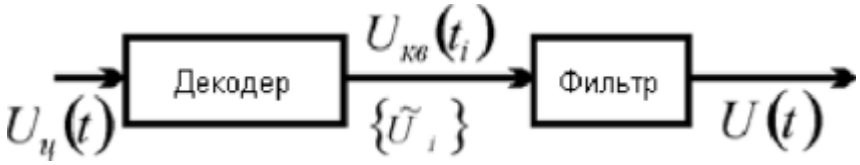


Рисунок 4.7 - Структурная схема ЦАП

Декодер осуществляет преобразование кодовых комбинаций в квантованную последовательность отсчетов. Сглаживающий фильтр восстанавливает непрерывное сообщение по квантованным значениям.

В общем случае ЦАП можно разделить на преобразователи с прямым и промежуточным преобразованием. ЦАП с прямым преобразованием делятся на последовательные и параллельные.

Например, ЦАП параллельного типа с прямым преобразованием можно реализовать как на рисунке 4.7.

Таким образом, в состав ЦАП такого типа входят: источник опорного напряжения, делитель на основе матрицы взвешенных резисторов, ключи и операционный усилитель. В этой схеме n - разрядность ЦАП. Недостатком данной реализации ЦАП является чувствительность к разбросу сопротивлений AR резисторов. При этом AR должна удовлетворять условию: $AR/R < /2^{n+1}$.

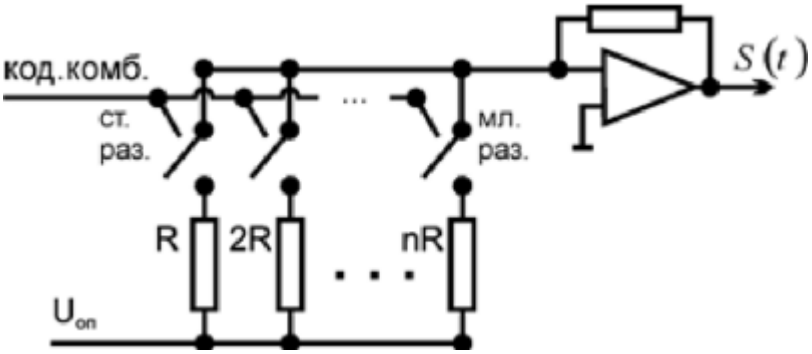


Рисунок 4.8 - Структурная схема ЦАП параллельного типа с прямым преобразованием

В ЦАП с промежуточным преобразованием входной код вначале преобразуют в промежуточную величину, представленную длительностью или частотой следования импульсов, а затем в выходной сигнал.

Важным этапом во многих процессах управления является *цифро-аналоговое* преобразование - генерация аналогового сигнала с уровнем напряжения, соответствующим цифровому значению на входе. Эта процедура используется для передачи от компьютера управляющего сигнала исполнительному механизму или опорного значения для регулятора. ЦА-преобразование также необходимый шаг в выполнении обратного аналого-цифрового *АЦ* преобразования.

Идеальный цифро-аналоговый преобразователь вырабатывает выходной сигнал, линейно зависящий от n-битного цифрового сигнала.

В наиболее распространённых схемах каждый бит входного слова управляет некоторой составляющей выходного напряжения, которое генерируется каскадом сопротивлений (рисунок 4.9). Величины резисторов выбираются так, чтобы получать напряжения, равные 1/2, 1/4, ..., 1/2n опорного значения, которые соответствуют позиции соответствующего бита в слове. Эти значения складываются под управлением входных бит и затем усиливаются. ЦАП можно также сконструировать и для получения токового выхода.

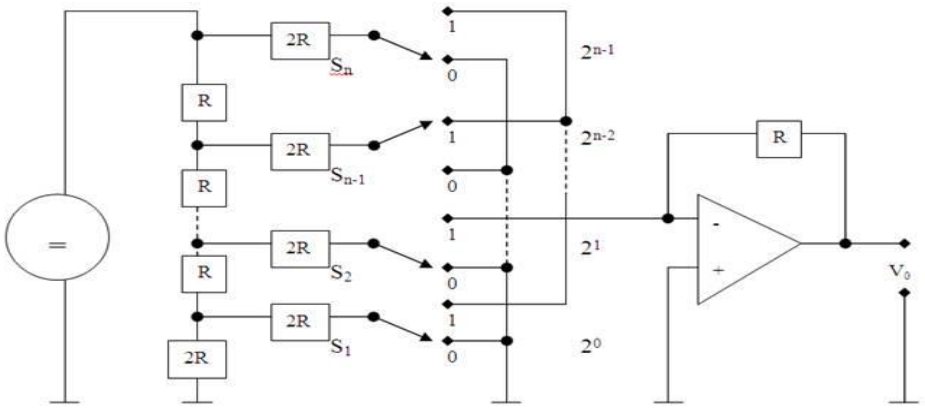


Рисунок 4.9 - Цифро-аналоговый преобразователь с каскадом сопротивлений

Положение ключей S_1,……S_n соответствует либо 0, либо 1 во входном цифровом слове. Выходное напряжение составляется из последовательно убывающих членов:

$$V_0 = -V_{ref} \cdot \left(\frac{S_1}{2^2} + \frac{S_2}{2^2} + \frac{S_N}{2^N} \right).$$

Например, в 8-битном ЦАП байт приводит к следующему выходному напряжению (при -10V):

$$V_0 = V_{ref} \cdot \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{16} + \frac{1}{32} + \frac{1}{256} \right) \approx -3.48B.$$

Очевидно, что ЦАП выдает только дискретные выходные напряжения с разрешением 2-n.

Если при изменении значения входного слова соответствующие ключи ЦАП не изменяют своего состояния все одновременно, то в переходном режиме может появиться нежелательный всплеск напряжения на аналоговом входе. Для устранения этой проблемы последовательно с ЦАП включают **схему** выборки и хранения (стабилизатор), которая поддерживает выходное значение постоянным, пока ключи установятся.

Самые важные характеристики ЦАП, которые нужно учитывать при его выборе или разработке, перечислены ниже:

1) Линейность: в какой степени связь между цифровым входом выходным напряжением линейна, или, иначе, величина отклонения реального выходного напряжения от расчетного из-за нелинейности.

2) Нулевое смещение: значение выходного сигнала при нулевом значении на цифровом входе. Всегда должна быть возможность подстроить это значение, например с помощью потенциометра или программного управления.

3) Время установления: время, необходимое для установления выходного напряжения на новое постоянное значение.

4) Быстродействие: максимальная скорость изменения выходного напряжения (в В/мкс).

4.3 Методы коммутации в каналах связи

4.3.1 Коммутация каналов.

Выделяют два основных типа каналов: коммутация каналов и коммутацию пакетов

Сети с коммутацией каналов ведут историю от телефонных сетей с конца XIX века. Сети с коммутацией пакетов появились в конце 60-х гг. XX века в первых глобальных компьютерных сетях. Способ коммутации пакетов является более гибким и универсальным.

При коммутации каналов между конечными узлами сети образуется составной физический канал из последовательно соединенных коммутаторами промежуточных канальных участков. Условие создания такого канала – равенство скоростей передачи данных каждым участком. Данные можно передавать после установления соединения, в результате которого создается составной канал. Коммутация каналов может быть пространственной и временной.

Пространственный коммутатор – это матрица с равным числом входов и выходов *N*.

В узлах сетки расположены коммутирующие элементы. В каждом столбце может быть замкнуто не более одного элемента.

Недостаток схемы: большое число коммутирующих элементов – N^2 .

Для устранения этого недостатка используют многоступенчатые коммутаторы. На рисунке 4.11 приведена схема трехступенчатого коммутатора.

Рисунок 4.11 - Схема трехступенчатого коммутатора

Здесь число переключательных элементов уменьшается за счет увеличения задержки коммутации.

Временной коммутатор может строиться на основе буферной памяти. При этом происходит задержка как минимум на время цикла запись-чтение.

Преимущества способа коммутации каналов:

1) известная и постоянная скорость передачи данных по установленному соединению.

2) малые и постоянные временные задержки данных.

Недостатки способа коммутации каналов:

1) отказы на обслуживание соединения, если какой-нибудь из канальных участков перегружен.

2) неэффективное использование физических каналов.

3) составному каналу отводится все время соединения, тогда как взаимодействие компьютеров не является равномерным, т.е. динамическое перераспределение пропускной способности канала отсутствует.

4) Неизбежные задержки передачи данных за счет времени установления соединения.

Типичные режимы работы компьютерных сетей сопровождаются значительными вариациями скорости передачи. Отношение средней интенсивности обмена данными к максимально возможной, называемое коэффициентом пульсаций трафика, может превышать 1:100, т.е. скоммутированный канал будет большую часть времени простаивать, и будет

недоступен другим пользователям сети. Поэтому наиболее эффективна *коммутация пакетов*.

При коммутации пакетов передаваемое сообщение в исходном узле разбивается на небольшие части, называемые пакетами. *Сообщение* – это логически завершенная порция данных, которая имеет произвольную длину от нескольких байт до Мбайт. Пакеты имеют произвольную длину, но в узких пределах, как правило, от нескольких байт до 1,5 *Кб*. Это позволяет ускорить передачу данных в больших сетях за счет параллельной передачи пакетов одного сообщения на разных участках сети.

При появлении ошибки требуется повторная передача короткого пакета, а не всего длинного сообщения. Ограничение размера пакета сверху позволяет обойтись меньшими объемами буферной памяти в транзитных узлах на маршрутах передачи.

Каждый пакет имеет свой заголовок, содержащий адресную информацию для доставки пакета узлу назначения, и номер пакета, используемый на приемной стороне для сборки сообщения. Таким образом, пакеты передаются сетью как независимые блоки данных. Коммутаторы сети принимают пакеты, и по адресной информации заголовков передают их друг другу, пока не будет достигнут узел назначения.

Отличия коммутаторов пакетной сети от коммутаторов каналов в том, что первые имеют внутреннюю буферную память для временного хранения пакетов. В этой памяти пакет может храниться, когда в моменты его приема выходной порт коммутатора занят передачей другого пакета.

Тогда принятый пакет будет находиться в очереди пакетов в буферной памяти выходного порта коммутатора, и начнет передаваться в момент, когда до него дойдет очередь. Такая схема позволяет сглаживать пульсации трафика на магистральных связях между коммутаторами, что повышает пропускную способность сети в целом. То есть при очень неравномерном трафике, поступающем от конечных узлов на коммутаторы, соединение между коммутаторами загружается более равномерно и поток пакетов в магистральных каналах, соединяющих коммутаторы верхнего уровня, имеет почти максимальный коэффициент использования. Таким образом, буферизация пакетов может достигать коэффициентов загрузки близких к *1* по сравнению с коэффициентом пульсаций отдельных пользователей.

Метод коммутации каналов широко используется до сих пор для образования высокоскоростных постоянных соединений в первичных сетях, при создании магистральных физических каналов и между коммутаторами компьютерных и телефонных сетей.

Элементарный канал (или просто канал) - это базовая техническая характеристика сети с коммутацией каналов, представляющая собой некоторое фиксированное в пределах данного типа -сетей значение пропускной способности. Любая линия связи в сети с коммутацией каналов имеет пропускную способность, кратную элементарному каналу, принятому для данного типа сети.

Значение элементарного канала, или, другими словами, минимальная единица пропускной способности линии связи, выбирается с учетом разных факторов. Но элементарный канал не стоит выбирать меньше минимально необходимой пропускной способности для передачи ожидаемой предложенной нагрузки.

Особенностью сетей с коммутацией каналов является то, что пропускная способность каждой линии связи должна быть равна целому числу элементарных каналов.

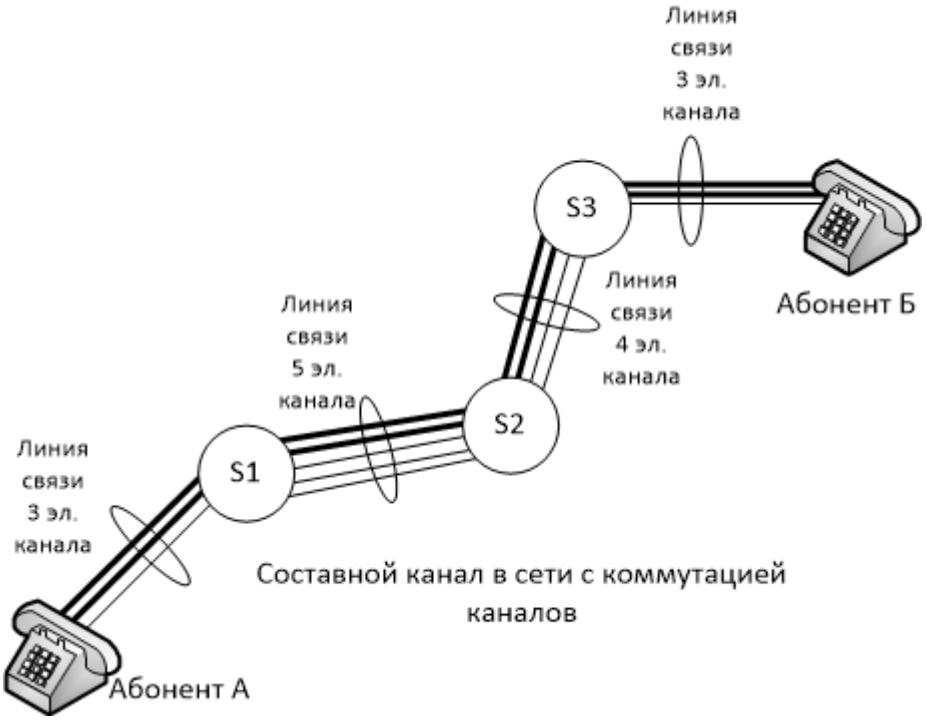


Рисунок 4.12 - Составной канал в сети с коммутацией каналов

На рисунке 4.12 представлен фрагмент сети. Предположим, что эта сеть характеризуется элементарным каналом Р бит/с, В сети существуют линии связи разной пропускной способности, состоящие из 2, 3, 4 и 5 элементарных каналов. На рисунке показаны два абонента, А и В, генерирующие во время сеанса связи (телефонного разговора) информационный поток, для которого в сети был предусмотрен маршрут, проходящий через четыре коммутатора S1, S2, S3 и S4. Предположим также, что интенсивность информационного потока между абонентами не превосходит 2Р бит/с. Тогда для обмена данными этим двум абонентам достаточно иметь в своем распоряжении по паре элементарных каналов, «выделенных» из каждой линии связи, лежащей на маршруте следования данных от пункта А к пункту В. На рисунке эти элементарные каналы, необходимые абонентам А и В, обозначены толстыми линиями.

Связь, построенную путем коммутации (соединения) элементарных каналов, называют составным каналом.

Подчеркнем следующие свойства составного канала:

- составной канал на всем своем протяжении состоит из одинакового количества элементарных каналов;
- составной канал имеет постоянную и фиксированную пропускную способность на всем своем протяжении;
- составной канал создается временно на период сеанса связи двух абонентов;
- на время сеанса связи все элементарные каналы, входящие в составной канал, поступают в исключительное пользование абонентов, для которых был создан этот составной канал;
- в течение всего сеанса связи абоненты могут посылать в сеть данные со скоростью, не превышающей пропускную способность составного канала;
- данные, поступившие в составной канал, гарантированно доставляются вызываемому абоненту без задержек, потерь и с той же скоростью (скоростью источника) вне зависимости от того, существуют ли в это время в сети другие соединения или нет;
- после окончания сеанса связи элементарные каналы, входившие в соответствующий составной канал, объявляются свободными и возвращаются в пул распределяемых ресурсов для использования другими абонентами.

В сети может одновременно происходить несколько сеансов связи (обычная ситуация для телефонной сети, в которой одновременно передаются разговоры сотен и тысяч абонентов). Разделение сети между сеансами связи происходит на уровне элементарных каналов. Например, мы можем предположить, что после того как в линии связи S2 - S3 было выделено два канала для связи абонентов А и В, оставшиеся три элементарных канала были распределены между тремя другими сеансами связи, проходившими в это же время и через эту же линию связи. Такое мультиплексирование позволяет одновременно передавать через каждый физический канал трафик нескольких логических соединений.

Таким образом, продвижение данных в сетях с коммутацией каналов происходит в два этапа:

1) В сеть поступает служебное сообщение — запрос, который несет адрес вызываемого абонента и организует создание составного канала.

2) По подготовленному составному каналу передается основной поток данных, для передачи которого уже не требуется никакой вспомогательной информации, в том числе адреса вызываемого абонента. Коммутация данных в коммутаторах выполняется на основе локальных признаков — номеров элементарных каналов.

Запросы на установление соединения не всегда завершаются успешно. Если на пути между вызывающим и вызываемым абонентами отсутствуют свободные элементарные каналы или вызываемый узел занят, то происходит отказ в установлении соединения. Сети с коммутацией пакетов, так же как и сети с коммутацией каналов, состоят из коммутаторов, связанных физическими линиями связи. Однако передача данных в этих сетях

происходит совершенно по-другому. Например, она может принять данные для передачи, не заботясь о резервировании линий связи на пути следования этих данных и не гарантируя требуемую пропускную способность. Сеть с коммутацией пакетов не создает заранее для своих абонентов отдельных, выделенных исключительно для них каналов связи. Данные могут задерживаться и даже теряться по пути следования.

Два коммутатора объединены каналом связи с пропускной способностью 100 Мбит/с. Пользователи сети подключаются к сети с помощью каналов доступа (access link) с пропускной способностью 10 Мбит/с. Предположим, что все пользователи создают одинаковый пульсирующий трафик со средней скоростью 1 Мбит/с. При этом в течение непродолжительных периодов времени скорость предложенной нагрузки возрастает до максимальной скорости канала доступа, то есть до 10 Мбит/с. Такие периоды длятся не более одной секунды. Предположим также, что все пользователи, подключенные к коммутатору S1, передают информацию только пользователям, подключенным к коммутатору S2.

Пусть представленная на рисунке сеть является сетью с коммутацией каналов. Поскольку скорость пользовательского трафика достигают 10 Мбит/с, каждому из пользователей необходимо установить соединение с пропускной способностью 10 Мбит/с.

Рисунок 4.13 - Сравнение эффективности сетей с коммутацией пакетов и каналов

Таким образом, одновременно через сеть смогут передавать данные только 10 пользователей. Суммарная средняя скорость передачи данных через сеть будет равна только 10 Мбит/с (10 пользователей передают данные со средней скоростью 1 Мбит/с). Следовательно, линия связи между коммутаторами, хотя и имеет общую пропускную способность 100 Мбит/с, используется только на 10 %.

Рассмотрим вариант, когда та же сеть работает на основе техники коммутации пакетов. При средней скорости пользовательских потоков 1 Мбит/с сеть может передавать одновременно до 100/1 = 100 (!) информационных потоков пользователей, полностью расходуя пропускную способность канала между коммутаторами. Однако это справедливо, если емкости буферов коммутаторов достаточно для хранения пакетов на периодах

перегрузки, когда суммарная скорость потока данных превышает 100 Мбит/с. Оценим необходимый объем буфера коммутатора S1. За период перегрузки в коммутатор S1 от каждого потока поступит 10 Мбит/с × 1 с =10 Мбит, а от 100 потоков — 1000 Мбит. Из этих данных за одну секунду коммутатор успеет передать в выходной канал только 100 Мбит. Значит, чтобы ни один пакет не был потерян во время перегрузки сети, общий объем входных буферов коммутатора должен быть не меньше 1000 - 100 - 900 Мбит, или более 100 Мбайт. Сегодняшние коммутаторы обычно имеют меньшие объемы буферов (1-10Мбайт).

На основании данных таблицы 4.1. можно аргументировано утверждать, в каких случаях рациональнее использовать сети с коммутацией каналов, а в каких — с коммутацией пакетов.

Таблица 4.1 - Сравнение сетей с коммутацией каналов и пакетов

Коммутация каналов	Коммутация пакетов
Необходимо предварительно устанавливать соединение	Отсутствует этап установления соединения (дейтаграммный способ)
Адрес требуется только на этане установления соединения	Адрес и другая служебная информация передаются с каждым пакетом
Сеть может отказать абоненту в установлении соединения	Сеть всегда готова принять данные от абонента
Гарантированная пропускная способность (полоса пропускания) для взаимодействующих абонентов	Пропускная способность сети для абонентов неизвестна, задержки передачи носят случайный характер
Трафик реального времени передается без задержек	Ресурсы сети используются эффективно при передаче пульсирующего трафика
Высокая надежность передачи	Возможные потери данных из-за переполнения буферов
Нерациональное использование пропускной способности каналов, снижающее общую эффективность сети	Автоматическое динамическое распределение пропускной способности физического канала между абонентами

Разные подходы к выполнению коммутации.

В общем случае решение каждой из частных задач коммутации — определение потоков и соответствующих маршрутов, фиксация маршрутов в конфигурационных параметрах и таблицах сетевых устройств, распознавание потоков и передача данных между интерфейсами одного устройства, мультиплексирование/демультиплексирование потоков и разделение среды передачи — тесно связано с решением всех остальных. Комплекс технических решений обобщенной задачи коммутации в совокупности составляет базис любой сетевой технологии. От того, какой механизм прокладки маршрутов,

продвижения данных и совместного использования каналов связи заложен в той или иной сетевой технологии, зависят ее фундаментальные свойства.

Среди множества возможных подходов к решению задачи коммутации абонентов в сетях выделяют два основополагающих:

- коммутация каналов (circuit switching);
- коммутация пакетов (packet switching).

Внешне обе эти схемы соответствуют приведенной на рисунке 4.14 структуре сети, однако возможности и свойства их различны.

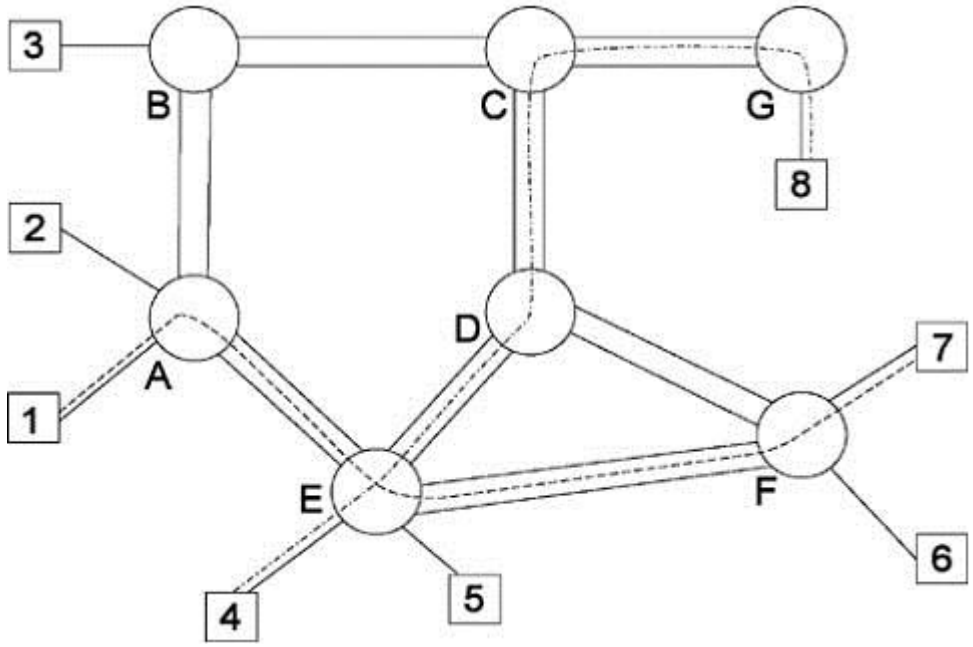


Рисунок 4.14 - Общая структура сети с коммутацией абонентов

Сети с коммутацией каналов имеют более богатую историю, они произошли от первых телефонных сетей. Сети с коммутацией пакетов сравнительно молоды, они появились в конце 60-х годов как результат экспериментов с первыми глобальными компьютерными сетями. Каждая из этих схем имеет свои достоинства и недостатки, по долгосрочным прогнозам многих специалистов, будущее принадлежит технологии коммутации пакетов, как более гибкой и универсальной.

При коммутации каналов коммутационная сеть образует между конечными узлами непрерывный составной физический канал из последовательно соединенных коммутаторами промежуточных канальных участков. Условием того, что несколько физических каналов при последовательном соединении образуют единый физический канал, является равенство скоростей передачи данных в каждом из составляющих физических каналов. Равенство скоростей означает, что коммутаторы такой сети не должны буферизовать передаваемые данные.

В сети с коммутацией каналов перед передачей данных всегда необходимо выполнить процедуру установления соединения, в процессе

которой и создается составной канал. И только после этого можно начинать передавать данные.

Например, если сеть, изображенная на рисунке 4.14, работает по технологии коммутации каналов, то узел 1, чтобы передать данные узлу 7, сначала должен передать специальный запрос на установление соединения коммутатору А, указав адрес назначения 7. Коммутатор А должен выбрать маршрут образования составного канала, а затем передать запрос следующему коммутатору, в данном случае Е. Затем коммутатор Е передает запрос коммутатору F, а тот, в свою очередь, передает запрос узлу 7. Если узел 7 принимает запрос на установление соединения, он направляет по уже установленному каналу ответ исходному узлу, после чего составной канал считается скоммутированным, и узлы 1 и 7 могут обмениваться по нему данными.

Рисунок 4.15 - Установление составного канала

Техника коммутации каналов имеет свои достоинства и недостатки.

Достоинства коммутации каналов:

1) Постоянная и известная скорость передачи данных по установленному между конечными узлами каналу. Это дает пользователю сети возможности на основе заранее произведенной оценки необходимой для качественной передачи данных пропускной способности установить в сети канал нужной скорости.

2) Низкий и постоянный уровень задержки передачи данных через сеть. Это позволяет качественно передавать данные, чувствительные к задержкам (называемые также трафиком реального времени) - голос, видео, различную технологическую информацию.

Недостатки коммутации каналов.

1) Отказ сети в обслуживании запроса на установление соединения. Такая ситуация может сложиться из-за того, что на некотором участке сети соединение нужно установить вдоль канала, через который уже проходит максимально возможное количество информационных потоков. Отказ может случиться и на конечном участке составного канала — например, если абонент способен поддерживать только одно соединение, что характерно для многих телефонных сетей. При поступлении второго вызова к уже разговаривающему абоненту сеть передает вызывающему абоненту короткие гудки — сигнал «занято».

2) Нерациональное использование пропускной способности физических каналов. Та часть пропускной способности, которая отводится составному каналу после установления соединения, предоставляется ему на все время, т.е. до тех пор, пока соединение не будет разорвано. Однако абонентам не всегда нужна пропускная способность канала во время соединения, например в телефонном разговоре могут быть паузы, еще более неравномерным во времени является взаимодействие компьютеров. Невозможность динамического перераспределения пропускной способности представляет собой принципиальное ограничение сети с коммутацией каналов, так как единицей коммутации здесь является информационный поток в целом.

3) Обязательная задержка перед передачей данных из-за фазы установления соединения.

Достоинства и недостатки любой сетевой технологии относительны. В определенных ситуациях на первый план выходят достоинства, а недостатки становятся несущественными. Так, техника коммутации каналов хорошо работает в тех случаях, когда нужно передавать только трафик телефонных разговоров. Здесь с невозможностью "вырезать" паузы из разговора и более рационально использовать магистральные физические каналы между коммутаторами можно мириться. А вот при передаче очень неравномерного компьютерного трафика эта нерациональность уже выходит на первый план.

4.3.2 Коммутация пакетов.

Важнейшим принципом функционирования сетей с коммутацией пакетов является представление информации, передаваемой по сети, в виде структурно отделенных друг от друга порций данных, называемых пакетами.

Каждый пакет снабжен заголовком, в котором содержится адрес назначения и другая вспомогательная информация (длина поля данных, контрольная сумма и др.), используемая для доставки пакета адресату. Наличие адреса в каждом пакете является одним из важнейших особенностей техники коммутации пакетов, так как каждый пакет может быть обработан коммутатором независимо от других пакетов, составляющих сетевой трафик. Помимо заголовка у пакета может иметься еще одно дополнительное поле, размещаемое в конце пакета и поэтому называемое концевиком. В концевике

обычно помещается контрольная сумма, которая позволяет проверить, была ли искажена информация при передаче через сеть или нет.

Пакеты поступают в сеть без предварительного резервирования линий связи и не с фиксированной заранее заданной скоростью, как это делается в сетях с коммутацией каналов, а в том темпе, в котором их генерирует источник. Предполагается, что сеть с коммутацией пакетов, в отличие от сети с коммутацией каналов, всегда готова принять пакет от конечного узла.

Как и в сетях с коммутацией каналов, в сетях с коммутацией пакетов для каждого из потоков вручную или автоматически определяется маршрут, фиксируемый в хранящихся на коммутаторах таблицах коммутации. Пакеты, попадая на коммутатор, обрабатываются и направляются по тому или иному маршруту на основании информации, содержащейся в их заголовках, а также в таблице 4.1 коммутации (рисунок 4.15).

Пакеты, принадлежащие как одному и тому же, так и разным информационным потокам, при перемещении по сети могут «перемешиваться» между собой, образовывать очереди и «тормозить» друг друга. На пути пакетов могут встретиться линии связи, имеющие разную пропускную способность. В зависимости от времени суток может сильно меняться и степень загруженности линий связи, В таких условиях не исключены ситуации, когда пакеты, принадлежащими одному и тому же потоку, могут перемещаться по сети с разными скоростями и даже прийти к месту назначения не в том порядке, в котором они были отправлены.

Разделение данных на пакеты позволяет передавать неравномерный компьютерный трафик более эффективно, чем в сетях с коммутацией каналов. Это объясняется тем, что пульсации трафика от отдельных компьютеров носят случайный характер и распределяются во времени так, что их пики чаще всего не совпадают. Поэтому когда линия связи передает трафик большого количества конечных узлов, то в суммарном потоке пульсации сглаживаются, и пропускная способность линии используется более рационально, без длительных простоев. Это эффект иллюстрируется рисунок 4.16.

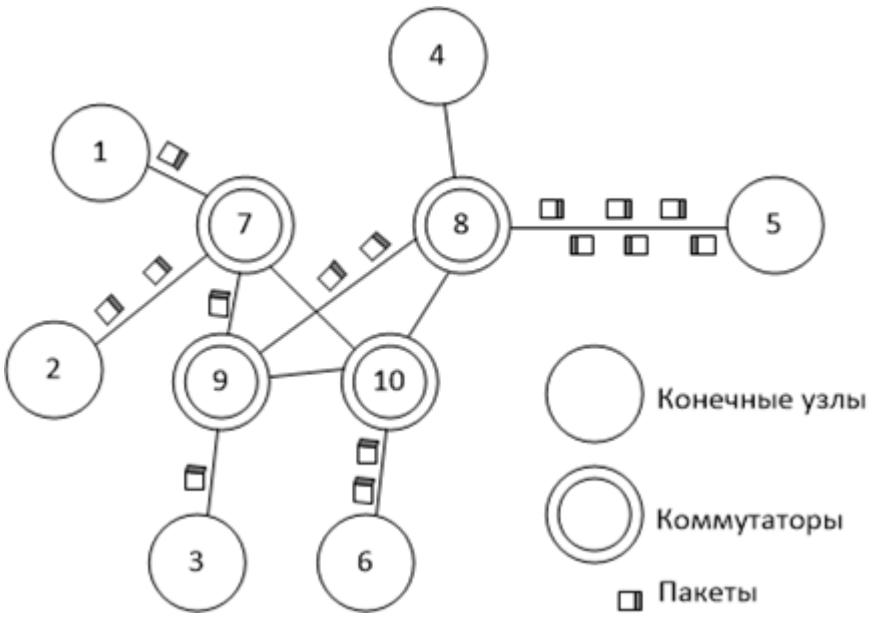


Рисунок 4.16 - Передача данных по сети в виде пакетов

.

Рисунок 4.17 - Сглаживание трафика в сетях с коммутацией пакетов

Важным аспектом всей системы передачи пакетов, является буферизация пакетов (рассмотреть самостоятельно).

Процедура согласования двумя конечными узлами сети некоторых параметров процесса обмена пакетами называется установлением логического соединения. Параметры, о которых договариваются два взаимодействующих узла, называются параметрами логического соединения.

Наличие логического соединения позволяет более рационально по сравнению с дейтаграммным способом обрабатывать пакеты. Например, при потере нескольких предыдущих пакетов может быть снижена скорость отправки последующих. Или благодаря нумерации пакетов и отслеживанию

номеров отправленных и принятых пакетов можно повысить надежность путем отбрасывания дубликатов, упорядочивания поступивших и повторения передачи потерянных пакетов.

Параметры соединения могут быть: постоянными, то есть не изменяющимися в течение всего соединения (например, идентификатор соединения, способ шифрования пакета или максимальный размер поля данных пакета), или переменными, то есть динамически отражающими текущее состояние соединения (например, последовательные номера передаваемых пакетов),

Логическое соединение может быть рассчитано на передачу данных как в одном направлении - от инициатора соединения, так и в обоих направлениях. После передачи некоторого законченного набора данных, например определенного файла, узел-отправитель инициирует разрыв данного логического соединения, посылая соответствующий служебный кадр.

После того как соединение установлено и все параметры согласованы, конечные узлы начинают передачу собственно данных. Пакеты данных обрабатываются коммутаторами точно так же, как и при дейтаграммной передаче: из заголовков пакетов извлекаются адреса назначения и сравниваются с записями в таблицах коммутации, содержащих информацию о следующих шагах по маршруту. Так же как дейтаграммы, пакеты, относящиеся к одному логическому соединению, в некоторых случаях (например, при отказе линии связи) могут доставляться адресату по разным маршрутам.

Передача с установлением соединения предоставляет больше возможностей в плане надежности и безопасности обмена данными, чем дейтаграммная передача. Однако этот способ более медленный, так как он подразумевает дополнительные вычислительные ты на установление и поддержание логического соединения.

Преимущества сетей с коммутацией пакетов:

1) Высокая пропускная способность сетей при передаче пульсирующего трафика.

2) Возможность динамического перераспределения пропускной способности физического канала согласно реальным потребностям трафика.

Недостатки сетей с коммутацией пакетов:

1) Неопределенность скорости передачи данных между абонентами сети, которая зависит от общей загрузки сети.

2) Переменная величина задержки пакетов при мгновенных перегрузках сети.

3) Возможные потери данных из-за переполнения буферной памяти транзитных узлов.

Эта техника коммутации пакетов была специально разработана для эффективной передачи компьютерного трафика. Первые шаги на пути создания компьютерных сетей на основе техники коммутации каналов показали, что этот вид коммутации не позволяет достичь высокой общей

пропускной способности сети. Типичные сетевые приложения генерируют трафик очень неравномерно, с высоким уровнем пульсации скорости передачи данных.

При коммутации пакетов все передаваемые пользователем сообщения разбиваются в исходном узле на сравнительно небольшие части, называемые пакетами. Напомним, что сообщением называется логически завершенная порция данных — запрос на передачу файла, ответ на этот запрос, содержащий весь файл и т.д. Сообщения могут иметь произвольную длину, от нескольких байт до многих мегабайт. Напротив, пакеты обычно тоже могут иметь переменную длину, но в узких пределах, например от 46 до 1500 байт.

Каждый пакет снабжается заголовком, в котором указывается адресная информация, необходимая для доставки пакета на узел назначения, а также номер пакета, который будет использоваться узлом назначения для сборки сообщения (рисунке 4.17).

Пакеты транспортируются по сети как независимые информационные блоки. Коммутаторы сети принимают пакеты от конечных узлов и на основании адресной информации передают их друг другу, а в конечном итоге — узлу назначения.

Коммутаторы пакетной сети отличаются от коммутаторов каналов тем, что они имеют внутреннюю буферную память для временного хранения пакетов, если выходной порт коммутатора в момент принятия пакета занят передачей другого пакета (рисунок 4.18). В этом случае пакет находится некоторое время в очереди пакетов в буферной памяти выходного порта, а когда до него дойдет очередь, он передается следующему коммутатору.

Такая схема передачи данных позволяет сглаживать пульсацию трафика на магистральных связях между коммутаторами и тем самым наиболее эффективно использовать их для повышения пропускной способности сети в целом.

Действительно, для пары абонентов наиболее эффективным было бы предоставление им в единоличное пользование скоммутированного канала связи, как это делается в сетях с коммутацией каналов.

В таком случае время взаимодействия этой пары абонентов было бы минимальным, так как данные без задержек передавались бы от одного абонента другому. Простои канала во время пауз передачи абонентов не интересуют, для них важно быстрее решить свою задачу.

Сеть с коммутацией пакетов замедляет процесс взаимодействия конкретной пары абонентов, так как их пакеты могут ожидать в коммутаторах, пока по магистральным связям передаются другие пакеты, пришедшие в коммутатор ранее.

Тем не менее, общий объем передаваемых сетью компьютерных данных в единицу времени при технике коммутации пакетов будет выше, чем при технике коммутации каналов. Это происходит потому, что пульсации отдельных абонентов в соответствии с законом больших чисел распределяются во времени так, что их пики не совпадают.

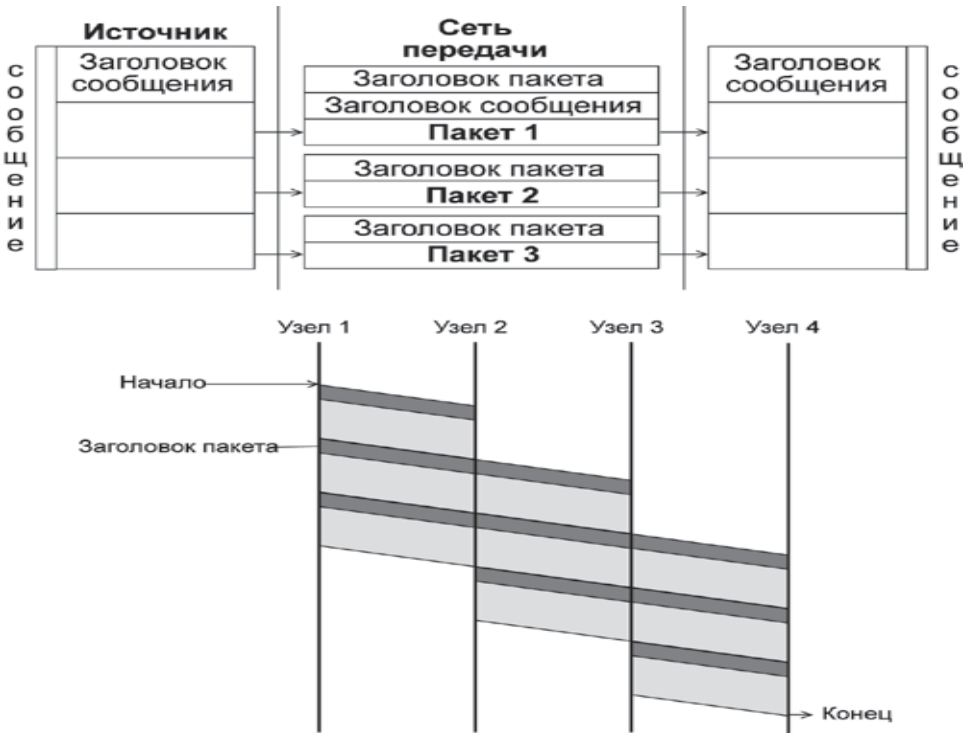


Рисунок 4.18 - Разбиение сообщения на пакеты

Поэтому коммутаторы постоянно и достаточно равномерно загружены работой, если число обслуживаемых ими абонентов действительно велико. На рис. 4.18 показано, что трафик, поступающий от конечных узлов на коммутаторы, распределен во времени очень неравномерно.

Однако коммутаторы более высокого уровня иерархии, которые обслуживают соединения между коммутаторами нижнего уровня, загружены более равномерно, и поток пакетов в магистральных каналах, соединяющих коммутаторы верхнего уровня, имеет почти максимальный коэффициент использования.

Буферизация сглаживает пульсации, поэтому коэффициент пульсации на магистральных каналах гораздо ниже, чем на каналах абонентского доступа — он может быть равным 1:10 или даже 1:2.

Сеть с коммутацией пакетов замедляет процесс взаимодействия конкретной пары абонентов, но повышает пропускную способность сети в целом.

Задержки в источнике передачи:

- время на передачу заголовков;
- задержки, вызванные интервалами между передачей каждого следующего пакета.

Задержки в каждом коммутаторе:

- время буферизации пакета;
- время коммутации, которое складывается из:
  а) времени ожидания пакета в очереди (переменная величина);
  б) времени перемещения пакета в выходной порт.

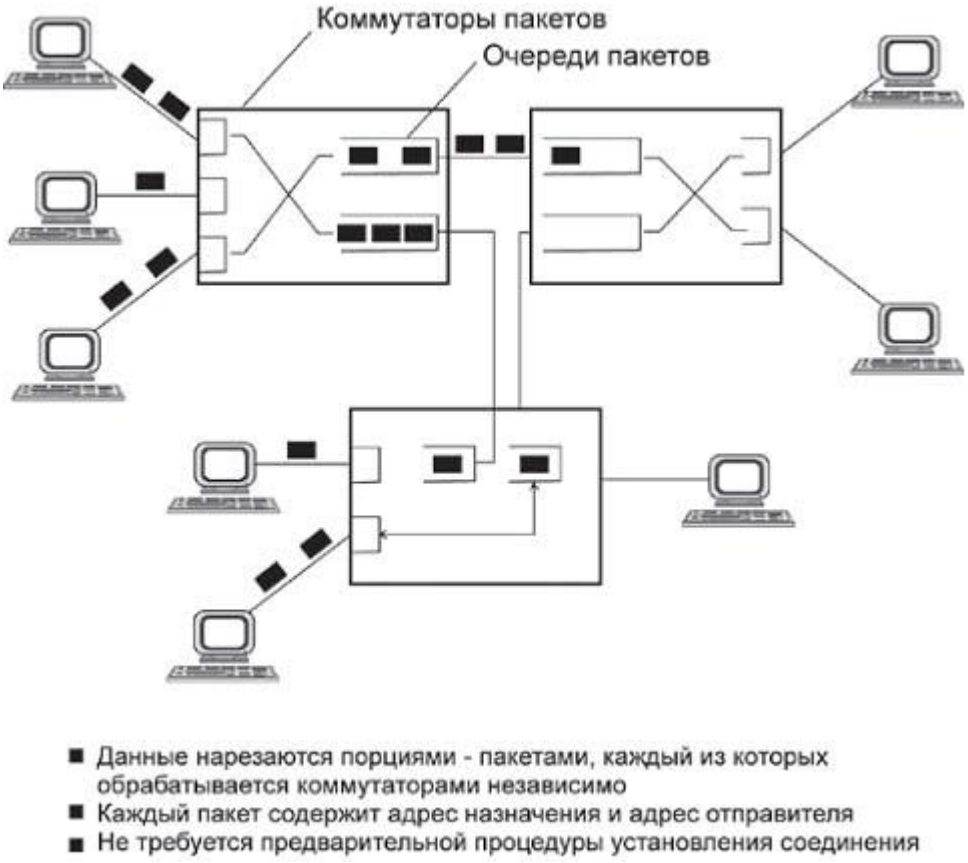


Рисунок 4.19 - Сглаживание пульсаций трафика в сети с коммутацией пакетов

Достоинства коммутации пакетов:

1) Высокая общая пропускная способность сети при передаче пульсирующего трафика.

2) Возможность динамически перераспределять пропускную способность физических каналов связи между абонентами в соответствии с реальными потребностями их трафика.

Недостатки коммутации пакетов:

1) Неопределенность скорости передачи данных между абонентами сети, обусловленная тем, что задержки в очередях буферов коммутаторов сети зависят от общей загрузки сети.

2) Переменная величина задержки пакетов данных, которая может быть достаточно продолжительной в моменты мгновенных перегрузок сети.

3) Возможные потери данных из-за переполнения буферов.

В настоящее время активно разрабатываются и внедряются методы, позволяющие преодолеть указанные недостатки, которые особенно остро проявляются для чувствительного к задержкам трафика, требующего при этом постоянной скорости передачи. Такие методы называются методами обеспечения качества обслуживания (Quality of Service, QoS).

Сети с коммутацией пакетов, в которых реализованы методы обеспечения качества обслуживания, позволяют одновременно передавать различные виды трафика, в том числе такие важные как телефонный и

компьютерный. Поэтому методы коммутации пакетов сегодня считаются наиболее перспективными для построения конвергентной сети, которая обеспечит комплексные качественные услуги для абонентов любого типа. Тем не менее, нельзя сбрасывать со счетов и методы коммутации каналов.

Сегодня они не только с успехом работают в традиционных телефонных сетях, но и широко применяются для образования высокоскоростных постоянных соединений в так называемых первичных (опорных) сетях технологий SDH и DWDM, которые используются для создания магистральных физических каналов между коммутаторами телефонных или компьютерных сетей.

Таблица 4.2 - Сравнение коммутации каналов и коммутации пакетов

Коммутация каналов	Коммутация пакетов
Гарантированная пропускная способность (полоса) для взаимодействующих абонентов	Пропускная способность сети для абонентов неизвестна, задержки передачи носят случайный характер
Сеть может отказать абоненту в установлении соединения	Сеть всегда готова принять данные от абонента
Трафик реального времени передается без задержек	Ресурсы сети используются эффективно при передаче пульсирующего трафика
Адрес используется только на этапе установления соединения	Адрес передается с каждым пакетом

Постоянная и динамическая коммутация.

Как сети с коммутацией пакетов, так и сети с коммутацией каналов можно разделить на два класса:

- сети с динамической коммутацией;
- сети с постоянной коммутацией.

В сетях с динамической коммутацией:

- разрешается устанавливать соединение по инициативе пользователя сети;
- коммутация выполняется только на время сеанса связи, а затем (по инициативе одного из пользователей) разрывается;
- в общем случае пользователь сети может соединиться с любым другим пользователем сети;
- время соединения между парой пользователей при динамической коммутации составляет от нескольких секунд до нескольких часов и завершается после выполнения определенной работы — передачи файла, просмотра страницы текста или изображения и т.п.

Примерами сетей, поддерживающих режим динамической коммутации, являются телефонные сети общего пользования, локальные сети, сети TCP/IP.

Сеть, работающая в режиме постоянной коммутации:

– разрешает паре пользователей заказать соединение на длительный период времени;

– соединение устанавливается не пользователями, а персоналом, обслуживающим сеть;

– период, на который устанавливается постоянная коммутация, составляет обычно несколько месяцев;

– режим постоянной (permanent) коммутации в сетях с коммутацией каналов часто называется сервисом выделенных (dedicated) или арендуемых (leased) каналов;

– в том случае, когда постоянное соединение через сеть коммутаторов устанавливается с помощью автоматических процедур, инициированных обслуживающим персоналом, его часто называют полупостоянным (semi-permanent) соединением, в отличие от режима ручного конфигурирования каждого коммутатора.

Наиболее популярными сетями, работающими в режиме постоянной коммутации, сегодня являются сети технологии SDH, на основе которых строятся выделенные каналы связи с пропускной способностью в несколько гигабит в секунду.

4.3.2.1 Пропускная способность сетей с коммутацией пакетов. Одним из отличий метода коммутации пакетов от метода коммутации каналов является неопределенность пропускной способности соединения между двумя абонентами. В случае коммутации каналов после образования составного канала пропускная способность сети при передаче данных между конечными узлами известна — это пропускная способность канала.

Данные после задержки, связанной с установлением канала, начинают передаваться на максимальной для канала скорости (рисунок 4.20.).

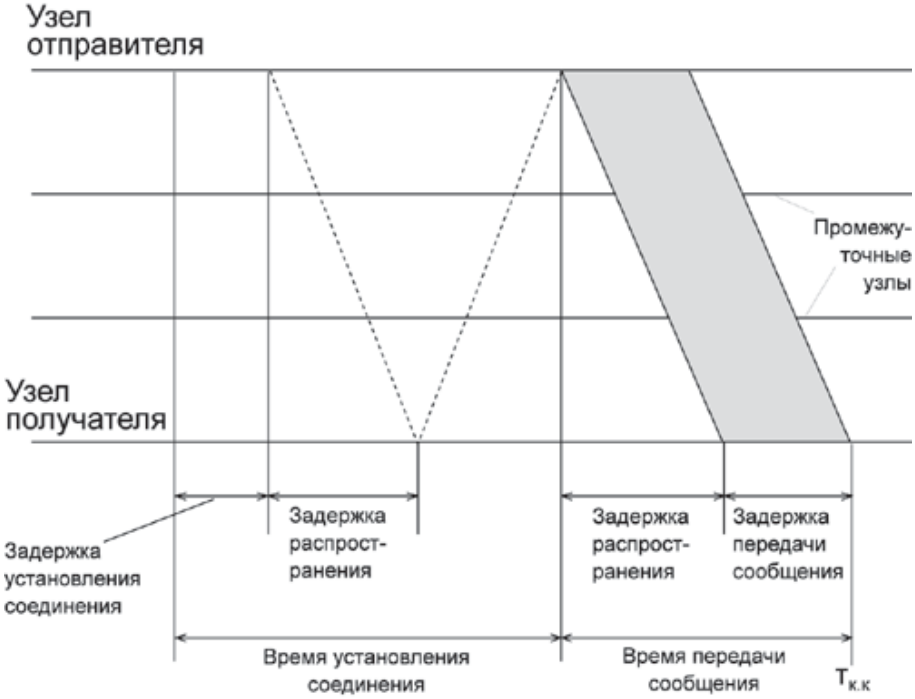


Рисунок 4.20 - Задержки передачи данных в сетях с коммутацией каналов

Время передачи сообщения в сети с коммутацией каналов $T_к$, где к - равно сумме задержки распространения сигнала по линии связи и задержки передачи сообщения. Задержка распространения сигнала зависит от скорости распространения электромагнитных волн в конкретной физической среде, которая колеблется от 0,6 до 0,9 скорости света в вакууме. Время передачи сообщения равно V/C, где V — объем сообщения в битах, а C — пропускная способность канала в битах в секунду.

В сети с коммутацией пакетов картина совсем иная.

Процедура установления соединения в этих сетях, если она используется, занимает примерно такое же время, как и в сетях с коммутацией каналов, поэтому будем сравнивать только время передачи данных.

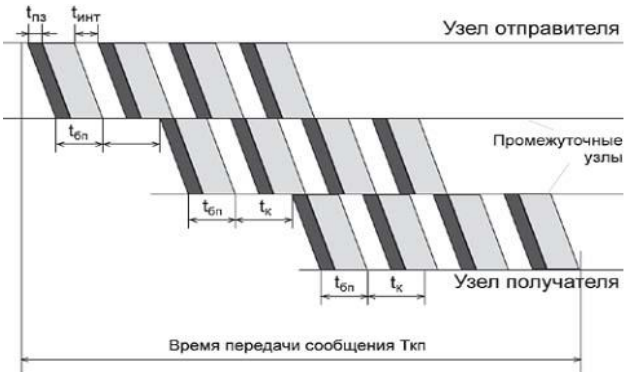


Рисунок 4.21 - Задержки при передаче данных в сетях с коммутацией пакетов

На рисунке 4.21 показан пример передачи данных в сети с коммутацией пакетов. Предполагается, что по сети передается сообщение того же объема, что и сообщение, передаваемое на рисунке 4.21, однако оно разделено на пакеты, каждый из которых снабжен заголовком.

Время передачи сообщения в сети с коммутацией пакетов обозначено на рисунке 4.21. При передаче этого разбитого на пакеты сообщения по сети с коммутацией пакетов возникают дополнительные задержки.

Во-первых, это задержки в источнике передачи, который, помимо передачи собственно сообщения, тратит дополнительное время на передачу заголовков $t_{п.з.}$, к тому же добавляются задержки $t_{инт}$, вызванные интервалами между передачей каждого следующего пакета (это время уходит на формирование очередного пакета стеком протоколов).

Во-вторых, дополнительное время тратится в каждом коммутаторе. Здесь задержки складываются из времени буферизации пакета $t_{б.п}$. (коммутатор не может начать передачу пакета, не приняв его полностью в свой буфер) и времени коммутации $t_к$. Время буферизации равно времени приема пакета с битовой скоростью протокола. Время коммутации складывается из времени ожидания пакета в очереди и времени перемещения пакета в выходной порт. Если время перемещения пакета фиксировано и, как правило, невелико (от нескольких микросекунд до нескольких десятков

микросекунд), то время ожидания пакета в очереди колеблется в очень широких пределах и заранее неизвестно, так как зависит от текущей загрузки сети.

Проведем грубую оценку задержки при передаче данных в сетях с коммутацией пакетов по сравнению с сетями с коммутацией каналов на простейшем примере. Пусть тестовое сообщение, которое нужно передать в обоих видах сетей, имеет объем 200 Кбайт. Отправитель находится от получателя на расстоянии 5000 км. Пропускная способность линий связи составляет 2 Мбит/с.

Время передачи данных по сети с коммутацией каналов складывается из времени распространения сигнала, которое для расстояния 5000 км можно оценить примерно в 25 мс (принимая скорость распространения сигнала равной 2/3 скорости света), и времени передачи сообщения, которое при пропускной способности 2 Мбит/с и длине сообщения 200 Кбайт равно примерно 800 мс. При расчете корректное значение К (210), равное 1024, округлялось до 1000, аналогично значение М (220), равное 1048576, округлялось до 1000000. Таким образом, передача данных оценивается в 825 мс.

Ясно, что при передаче этого сообщения по сети с коммутацией пакетов, обладающей такой же суммарной длиной и пропускной способностью каналов, пролегающих от отправителя к получателю, время распространения сигнала и время передачи данных будут такими же — 825 мс. Однако из-за задержек в промежуточных узлах общее время передачи данных увеличится. Сделаем оценку, на сколько возрастет это время. Будем считать, что путь от отправителя до получателя пролегает через 10 коммутаторов. Пусть исходное сообщение разбивается на пакеты в 1 Кбайт, всего 200 пакетов. Вначале оценим задержку, которая возникает в исходном узле. Предположим, что доля служебной информации, размещенной в заголовках пакетов, по отношению к общему объему сообщения составляет 10%. Следовательно, дополнительная задержка, связанная с передачей заголовков пакетов, составляет 10% от времени передачи целого сообщения, то есть 80 мс. Если принять интервал между отправкой пакетов равным 1 мс, то дополнительные потери за счет интервалов составят 200 мс. Таким образом, в исходном узле из-за пакетирования сообщения при передаче возникла дополнительная задержка в 280 мс.

Каждый из 10 коммутаторов вносит задержку коммутации, которая может составлять от долей до тысяч миллисекунд. В данном примере будем считать, что на коммутацию в среднем тратится 20 мс. Кроме того, при прохождении сообщений через коммутатор возникает задержка буферизации пакета. Эта задержка при величине пакета 1 Кбайт и пропускной способности линии 2 Мбит/с равна 4 мс. Общая задержка, вносимая 10 коммутаторами, составляет примерно 240 мс. В результате дополнительная задержка, созданная сетью с коммутацией пакетов, составила 520 мс. Учитывая, что вся

передача данных в сети с коммутацией каналов заняла 825 мс, эту дополнительную задержку можно считать существенной.

Хотя приведенный расчет носит очень приблизительный характер, он объясняет, почему процесс передачи для определенной пары абонентов в сети с коммутацией пакетов является более медленным, чем в сети с коммутацией каналов.

Неопределенная пропускная способность сети с коммутацией пакетов - это плата за ее общую эффективность при некотором ущемлении интересов отдельных абонентов. Аналогично, в мультипрограммной операционной системе время выполнения приложения предсказать невозможно, так как оно зависит от количества других приложений, с которыми данное приложение делит процессор.

На эффективность работы сети влияют размеры пакетов, которые передает сеть. Слишком большие размеры пакетов приближают сеть с коммутацией пакетов к сети с коммутацией каналов, поэтому эффективность сети падает. Кроме того, при большом размере пакетов увеличивается время буферизации на каждом коммутаторе. Слишком маленькие пакеты заметно увеличивают долю служебной информации, так как каждый пакет содержит заголовок фиксированной длины, а количество пакетов, на которые разбиваются сообщения, при уменьшении размера пакета будет резко расти. Существует некоторая «золотая середина», когда обеспечивается максимальная эффективность работы сети, однако это соотношение трудно определить точно, так как оно зависит от многих факторов, в том числе изменяющихся в процессе работы сети.

Поэтому разработчики протоколов для сетей с коммутацией пакетов выбирают пределы, в которых может находиться размер пакета, а точнее его поле данных, так как заголовок, как правило, имеет фиксированную длину. Обычно нижний предел поля данных выбирается равным нулю, что дает возможность передавать служебные пакеты без пользовательских данных, а верхний предел не превышает 4 Кбайт. Приложения при передаче данных пытаются занять максимальный размер поля данных, чтобы быстрее выполнить обмен, а небольшие пакеты обычно используются для коротких служебных сообщений, содержащих, к примеру, подтверждение доставки пакета.

При выборе размера пакета необходимо также учитывать интенсивность битовых ошибок канала. На ненадежных каналах необходимо уменьшать размеры пакетов, так как это сокращает объем повторно передаваемых данных при искажениях пакетов.

4.3.3 Дейтаграммный принцип передачи пакетов.

В сетях с коммутацией пакетов применяется два класса механизмов передачи пакетов:

- дейтаграммная передача;
- виртуальные каналы.

Дейтаграммный способ передачи данных основан на том, что все передаваемые пакеты обрабатываются независимо друг от друга, пакет за пакетом. Принадлежность пакета к определенному потоку между двумя конечными узлами и двумя приложениями, работающими на этих узлах, никак не учитывается.

Выбор следующего узла - например, коммутатора Ethernet или маршрутизатора IP/IPX - происходит только на основании адреса узла назначения, содержащегося в заголовке пакета. Решение о том, какому узлу передать пришедший пакет, принимается на основе таблицы, содержащей набор адресов назначения и адресную информацию, однозначно определяющую следующий (транзитный или конечный) узел. Такие таблицы имеют разные названия — например, для сетей Ethernet они обычно называются таблицей продвижения (forwarding table), а для сетевых протоколов, таких как IP и IPX, — таблицами маршрутизации (routing table). Далее для простоты будем пользоваться термином "таблица маршрутизации" в качестве обобщенного названия такого рода таблиц, используемых для дейтаграммной передачи на основании только адреса назначения конечного узла.

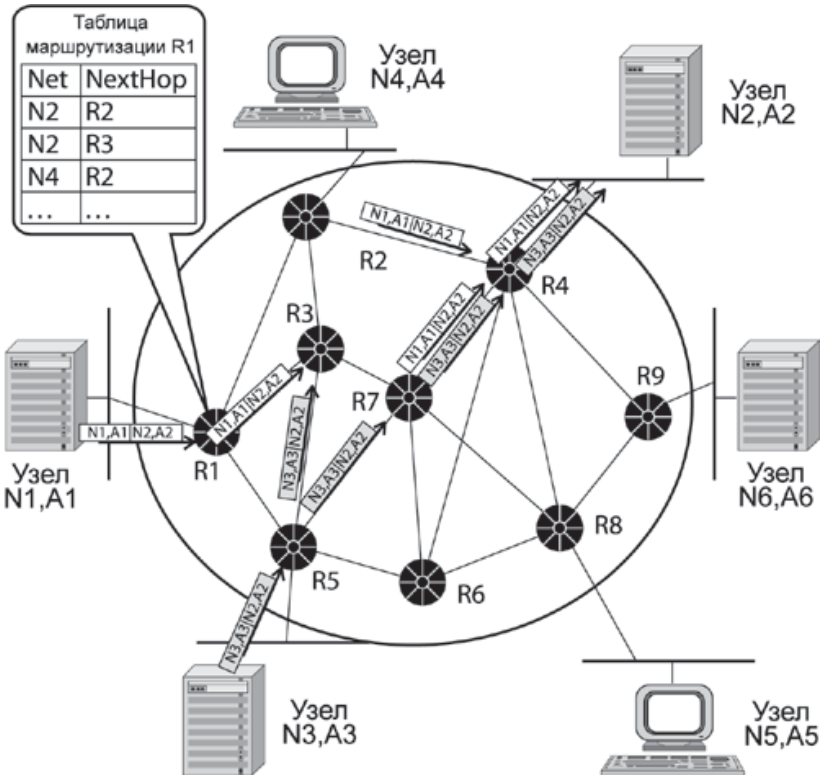


Рисунок 4.22 – Дейтаграмма передачи

В таблице маршрутизации для одного и того же адреса назначения может содержаться несколько записей, указывающих, соответственно, на различные адреса следующего маршрутизатора. Такой подход используется для повышения производительности и надежности сети. В примере на рис. 4.22 пакеты, поступающие в маршрутизатор R1 для узла назначения с

адресом N2, A2, в целях баланса нагрузки распределяются между двумя следующими маршрутизаторами - R2 и R3, что снижает нагрузку на каждый из них, а значит, уменьшает очереди и ускоряет доставку. Некоторая "размытость" путей следования пакетов с одним и тем же адресом назначения через сеть является прямым следствием принципа независимой обработки каждого пакета, присущего дейтаграммным протоколам. Пакеты, следующие по одному и тому же адресу назначения, могут добираться до него разными путями и вследствие изменения состояния сети, например отказа промежуточных маршрутизаторов.

Такая особенность дейтаграммного механизма как размытость путей следования трафика через сеть также в некоторых случаях является недостатком. Например, если пакетам определенной сессии между двумя конечными узлами сети необходимо обеспечить заданное качество обслуживания. Современные методы поддержки QoS работают эффективней, когда трафик, которому нужно обеспечить гарантии обслуживания, всегда проходит через одни и те же промежуточные узлы.

4.3.4 Виртуальные каналы в сетях с коммутацией пакетов.

Механизм виртуальных каналов (virtual circuit или virtual channel) создает в сети устойчивые пути следования трафика через сеть с коммутацией пакетов. Этот механизм учитывает существование в сети потоков данных.

Если целью является прокладка для всех пакетов потока единого пути через сеть, то необходимым (но не всегда единственным) признаком такого потока должно быть наличие для всех его пакетов общих точек входа и выхода из сети. Именно для передачи таких потоков в сети создаются виртуальные каналы.

На рисунке 4.23 показан фрагмент сети, в которой проложены два виртуальных канала. Первый проходит от конечного узла с адресом N1, A1 до конечного узла с адресом N2, A2 через промежуточные коммутаторы сети R1, R3, R7 и R4. Второй обеспечивает продвижение данных по пути N3, A3 — R5 — R7 — R4 — N2, A2.

Между двумя конечными узлами может быть проложено несколько виртуальных каналов, как полностью совпадающих в отношении пути следования через транзитные узлы, так и отличающихся.

Сеть только обеспечивает возможность передачи трафика вдоль виртуального канала, а какие именно потоки будут передаваться по этим каналам, решают сами конечные узлы. Узел может использовать один и тот же виртуальный канал для передачи всех потоков, которые имеют общие с данным виртуальным каналом конечные точки, или же только части из них. Например, для потока реального времени можно использовать один виртуальный канал, а для трафика электронной почты — другой. В последнем случае разные виртуальные каналы будут предъявлять разные требования к качеству обслуживания, и удовлетворить их будет проще, чем в том случае,

когда по одному виртуальному каналу передается трафик с разными требованиями к параметрам QoS.

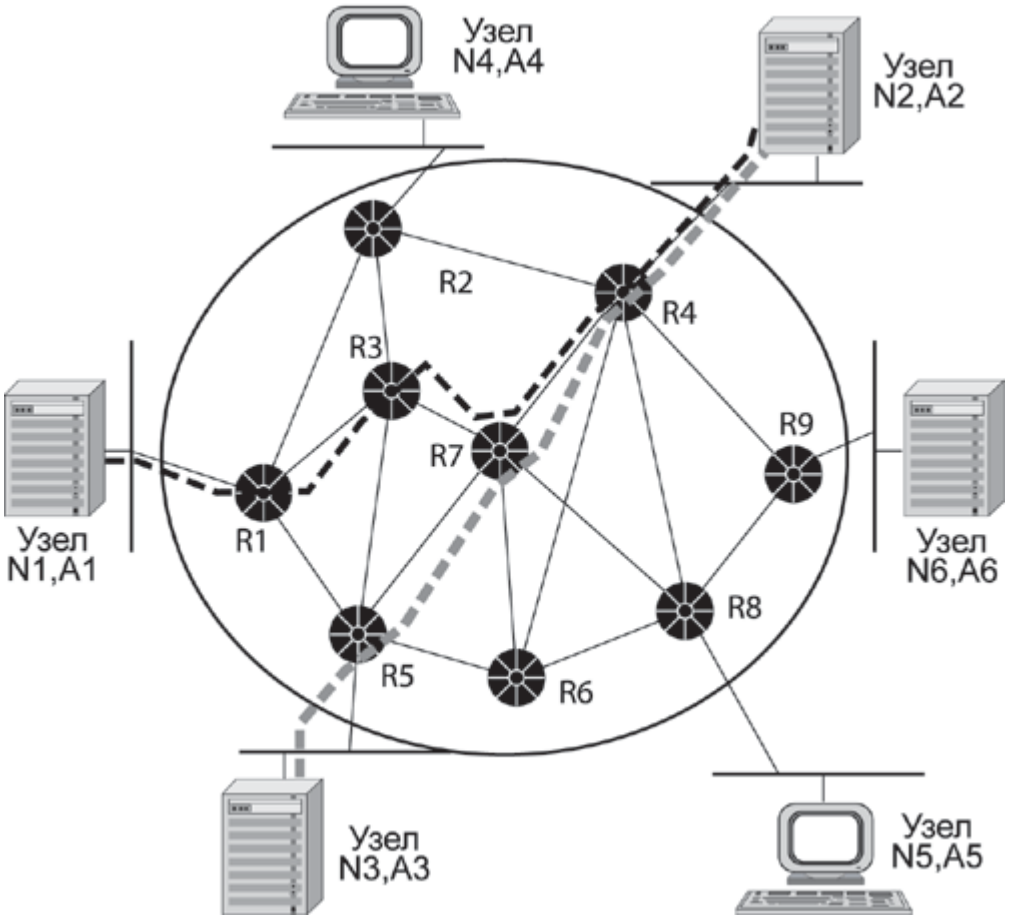


Рисунок 4.23 - Принцип работы виртуального канала

Важной особенностью сетей с виртуальными каналами является использование локальных адресов пакетов при принятии решения о передаче. Вместо достаточно длинного адреса узла назначения (его длина должна позволять уникально идентифицировать все узлы и подсети в сети, например технология ATM оперирует адресами длиной в 20 байт) применяется локальная, то есть меняющаяся от узла к узлу, метка, которой помечаются все пакеты, перемещаемые по определенному виртуальному каналу. Эта метка в различных технологиях называется по-разному: в технологии X.25 - номер логического канала (Logical Channel number, LCN), в технологии frame relay - идентификатор соединения уровня канала данных (Data Link Connection Identifier, DLCI), в технологии ATM - идентификатор виртуального канала (Virual Channel Identifier, VCI). Однако назначение ее везде одинаково - промежуточный узел, называемый в этих технологиях коммутатором, читает значение метки из заголовка пришедшего пакета и просматривает свою таблицу коммутации, в которой указывается, на какой выходной порт нужно передать пакет. Таблица коммутации содержит записи только о проходящих через данный коммутатор виртуальных каналах, а не обо всех имеющихся в

сети узлах (или подсетях, если применяется иерархический способ адресации). Обычно в крупной сети количество проложенных через узел виртуальных каналов существенно меньше количества узлов и подсетей, поэтому по размерам таблица коммутации намного меньше таблицы маршрутизации, а, следовательно, просмотр занимает гораздо меньше времени и не требует от коммутатора большой вычислительной мощности.

Идентификатор виртуального канала (именно такое название метки будет использоваться далее) также намного короче адреса конечного узла (по той же причине), поэтому и избыточность заголовка пакета, который теперь не содержит длинного адреса, а переносит по сети только идентификатор, существенно меньше.

4.3.5 Коммутация сообщений.

Коммутация сообщений по своим принципам близка к коммутации пакетов. Под коммутацией сообщений понимается передача единого блока данных между транзитными компьютерами сети с временной буферизацией этого блока на диске каждого компьютера. Сообщение в отличие от пакета имеет произвольную длину, которая определяется не технологическими соображениями, а содержанием информации, составляющей сообщение.

Транзитные компьютеры могут соединяться между собой как сетью с коммутацией пакетов, так и сетью с коммутацией каналов. Сообщение (это может быть, например, текстовый документ, файл с кодом программы, электронное письмо) хранится в транзитном компьютере на диске, причем довольно продолжительное время, если компьютер занят другой работой или сеть временно перегружена.

По такой схеме обычно передаются сообщения, не требующие немедленного ответа, чаще всего сообщения электронной почты. Режим передачи с промежуточным хранением на диске называется режимом «хранения-и-передачи» (store-and-forward).

Режим коммутации сообщений разгружает сеть для передачи трафика, требующего быстрого ответа, например трафика службы WWW или файловой службы.

Количество транзитных компьютеров обычно стараются уменьшить. Если компьютеры подключены к сети с коммутацией пакетов, то число промежуточных компьютеров уменьшается до двух. Например, пользователь передает почтовое сообщение своему серверу исходящей почты, а тот сразу старается передать его серверу входящей почты адресата. Но если компьютеры связаны между собой телефонной сетью, то часто используется несколько промежуточных серверов, так как прямой доступ к конечному серверу может быть в данный момент невозможен из-за перегрузки телефонной сети (абонент занят) или экономически невыгоден из-за высоких тарифов на дальнюю телефонную связь.

Техника коммутации сообщений появилась в компьютерных сетях раньше техники коммутации пакетов, но потом была вытеснена последней,

как более эффективной по критерию пропускной способности сети. Запись сообщения на диск занимает достаточно много времени, и кроме того, наличие дисков предполагает использование в качестве коммутаторов специализированных компьютеров, что влечет за собой существенные затраты на организацию сети. Сегодня коммутация сообщений работает только для некоторых не оперативных служб, причем чаще всего поверх сети с коммутацией пакетов, как служба прикладного уровня.

5 Тенденции объединения цифровых потоков

5.1 Плезиохронная цифровая иерархия

PDH - это принцип построения цифровых систем передачи, которые используют групповой мультиплексированный ИКМ-сигнал, состоящий из цифровых 30-канальных потоков (2,048 Мбит/сек) и требующий синхронизации скоростей цифровых потоков на входе оборудования группообразования.

Под термином «плезиохронные» (то есть «почти синхронные») понимается то, что скорости входных 30-канальных групп немного отличаются друг от друга вследствие допустимой нестабильности задающего генератора каналообразующего оборудования этих потоков. Поэтому прежде чем приступить к объединению этих потоков в 2,048 Мбит/сек, их нужно привести к одной скорости передачи путем добавления специальных синхронизирующих битов выравнивания скоростей. Биты выравнивания должны распознаваться на приемной стороне, когда происходит разделение (демультиплексирование) потоков из группового и выделение первоначального сигнала.

Такой групповой сигнал, состоящий из нескольких элементарных плезиохронных 30-канальных групп, называется плезиохронной цифровой иерархией ПЦИ (Plesiochronous Digital Hierarchy - PDH). Базовой системой передачи для построения более высоких уровней PDH является система передачи ИКМ-30.

В соответствии с принятыми в Европе стандартами при построении Цифровых Систем Передачи (ЦСП) объединяются 32 канала по 64 кбит/с. Из них 30 каналов предназначены для передачи пользовательской информации, а два являются служебными и используются для передачи сигналов синхронизации и управления.

При этом поочередно из каждого канала передается по одному байту. Длительность цикла составляет 125 мкс, т.е. в групповом сигнале в течение 1 с передаются по 8 000 байт из каждого канала. Это дает цифровой поток, имеющий скорость

$8 \cdot 8000 \cdot 32 = 2048000$ бит/с = 2 Мбит/с (далее скорости округляются).

Примером ЦСП с такой скоростью может служить распространенная в нашей стране ИКМ-30.

Следующие уровни иерархии образуются мультиплексированием четырех цифровых потоков предыдущего уровня, что приводит к скоростям 8 Мбит/с, 34 Мбит/с и 140 Мбит/с. При этом объединение компонентных потоков в агрегатный осуществляется уже не побайтно, а побитно.

В Северной Америке и Японии были приняты другие стандарты ПЦИ, в соответствии с которыми в ЦСП первого уровня объединяются 24 канала по 64 кбит/с, что приводит к скорости 1,5 Мбит/с. При переходе ко второму уровню происходит мультиплексирование четырех потоков, а к третьему — семи, в результате чего возникают потоки со скоростями 6 Мбит/с и 45 Мбит/с соответственно.

Обе системы ПЦИ приведены в таблице 5.1

Различия между ними делает весьма затруднительным их взаимодействие между собой.

Таблица 5.1 - Системы ПЦИ

Уровень иерархии	Европа	Северная Америка, Япония
0	64 кбит/с	64 кбит/с
1	2 Мбит/с	1,5 Мбит/с
2	8 Мбит/с	6 Мбит/с
3	34 Мбит/с	45 Мбит/с
4	140 Мбит/с	-

Плезиохронная цифровая иерархия (PDH, Plesiochronous Digital Hierarchy), PDH, технология PDH — система стандартов описывающих метод цифровой передачи данных, или звука в диапазоне частот человеческой речи закодированного с помощью метода импульсно-кодовой модуляции (ИКМ), основанный на временном разделении каналов в непрерывном потоке данных передаваемых между передатчиком и приемником расположенных в разных пунктах связи.

В технологии PDH в качестве входного используется сигнал основного цифрового канала (ОЦК), а на выходе формируется поток данных со скоростями n · 64 кбит/с.

Плезиохронная цифровая иерархия описана в системе стандартов принятых в области электросвязи в Америке, Японии, Европе.

5.1.1 Объединение цифровых потоков в плезиохронной цифровой иерархии. Плезиохронная цифровая иерархия включает в себя три стандарта скоростей. Первый стандарт.

ПЦИ включает в себя следующую иерархическую последовательность скоростей 1544 (или DS1) - 6312 (или DS2) - 44 736 (или DS3)-274176 (или DS4)кбит/с (округленно:1,5-6-45-274 Мбит/с).

Такая последовательность соответствует ряду коэффициентов мультиплексирования: n=24- для формирования сигнала DS1 из

24 сигналов DSO, m = 4 для формирования сигнала DS2 из 4 сигналов DS1, l = 7 для формирования сигнала DS3 из 7 сигналов DS2 и k = 6 для формирования сигнала DS4 из 6 сигналов DS3. Данный стандарт ПЦИ позволяет организовать 24, 96, 672 и 4032 канала DSO (или ОЦК).

Цифровые сигналы уровней DS1-DS2-DS3-DS4 обычно называют первичным цифровым каналом (потоком) - ПЦК, вторичным цифровым каналом - ВЦК, третичным цифровым каналом-ТЦК и четверичным цифровым каналом (потоком)- ЧЦК соответственно.

Второй стандарт ПЦИ, порожденный скоростью 1544 кбит/с, давал последовательность 1544 (или DS1) - 6312 (или DS2) - 32 064 (или DSJ3) - 97728 (или DSJ4) кбит/с (ряд приближенных величин составляет 1,5-6-32-98 Мбит/с). Коэффициенты мультиплексирования для данного стандарта, соответственно, равны n = 24, m = 4, l = 5, k = 3. Указанная иерархия позволяет организовать 24, 96, 480 и 1440 каналов DSO (или ОЦК). Здесь сигналы DSJ3 и DSJ4 называются цифровыми каналами (или потоками) 3-го и 4-го уровней японской ПЦИ.

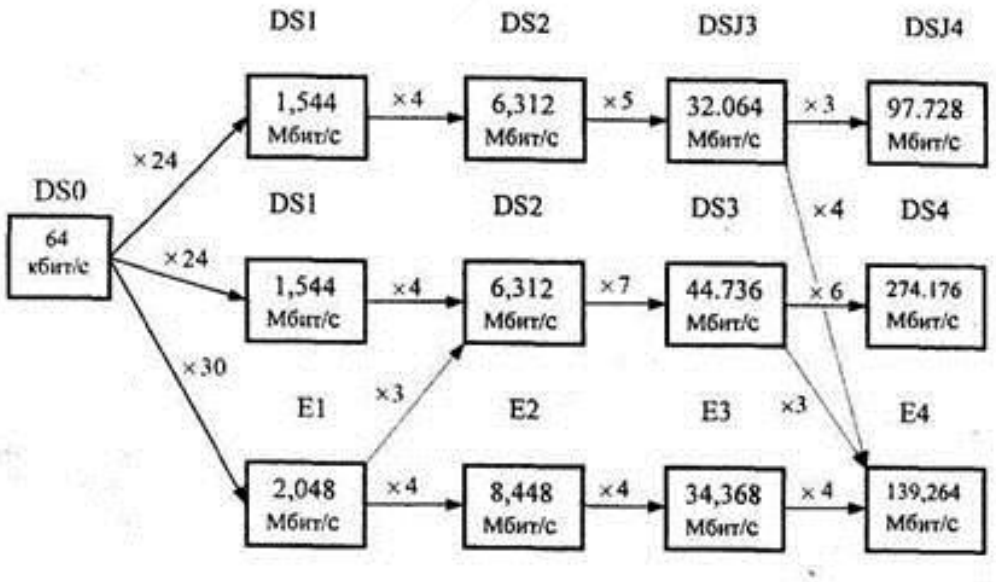
Третий стандарт ПЦИ, основанный на скорости 2048 кбит/с, порождает последовательность 2048 (или Е1: первичный цифровой канал-поток) - 8448 (или Е2: вторичный цифровой канал-поток) - 34 368 (или Е3: третичный цифровой канал-поток) - 139 264 (или Е4: четверичный цифрой канал поток) - 564992 (или Е5: пятиричный цифровой канал-поток) кбит/с или приближенно 2 - 8 - 34 - 140 -565 Мбит/с, что соответствует коэффициентам мультиплексирования, равным n=30, m=l=k=4. Указанный стандарт позволяет передавать, соответственно, 30, 120, 480, 1920 и 7680 ОЦК, что обычно ассоциируется в названии цифровых систем передачи ИКМ-30, ИКМ-120, ИКМ-480 и ИКМ-1920.

Схема мультиплексирования цифровых потоков ПЦИ различных стандартов представлена на рисунке 5.1.

Параллельное развитие трех различных стандартов ПЦИ сдерживало развитие глобальных телекоммуникационных сетей в мире и поэтому Международным союзом электросвязи по телекоммуникациям (МСЭ-Т) были сделаны шаги по их унификации и возможному объединению.

В результате был разработан стандарт согласно которому:

- были стандартизованы три первых уровня первого стандарта ПЦИ (DS1-DS2-DS3), четыре уровня второго стандарта (DS1-DS2-DSJ3-DSJ4) и четыре уровня третьего стандарта ПЦИ (Е1-Е2-Е3-Е4) в качестве основных при построении цифровых систем передачи на основе ИКМ и временного разделения каналов и указаны схемы кросс-мультплексирования стандартов, например, из третьего стандарта в первый (с первого на второй уровень) и обратно (с третьего на четвертый уровень), что и показано на рисунке 5.1 (коэффициенты мультиплексирования показаны на линиях связи блоков, представляющих скорости передачи);



(-) и кросс-мультиплексирования (…) в североамериканском (САС),японском (ЯС) и европейском (ЕС) стандартах ПЦИ .

Рисунок 5.1 - Схема мультиплексирования

- была сохранена ветвь 32 064...97 728 кбит/с (округленно 32...98 Мбит/с) во втором стандарте, т.е. уровни DSJ3 и DSJ4, параллельные уровням DS3 в первом стандарте и Е4 в третьем стандарте. Уровень DSJ3 фактически соответствует уровню Е3, что облегчает кросс-мультиплексирование со второго уровня на третий.

5.2 Структура и работа синхронного транспортного модуля

5.2.1 Объединение цифровых потоков в синхронной цифровой иерархии.

Необходимость принятия единого стандарта для систем связи в Европе и Америке, а также потребность в повышении максимальной скорости передачи и встроенных средствах управления сетью связи привели к разработке синхронной цифровой иерархии SDH (к сожалению, североамериканский вариант этого стандарта под названием SONET несколько отличается от европейского, хотя эти различия не столь существенны, как в случае, например, иерархии каналов Т-1, Т-2... и Е-1, Е-2...).

В SDH синхронный транспортный модуль (STM-1) образует нижний уровень иерархии. Он эквивалентен синхронному транспортному сигналу STS-3c в иерархии SONET с емкостью 155,52 Мбит/с. Четыре модуля STM-1 мультиплексируются в STM-4 (=STS-12c) с емкостью 622,08 Мбит/с, а четыре модуля STM-4 - в STM-12 (=STS-48c) с емкостью 2,488 Гбит/с. Иерархия определяет и более высокие уровни.

Мультиплексирование осуществляется побайтно, а не побитно, т. е., например, когда четыре потока данных STM-1 объединяются в STM-4, мультиплексор сначала отправляет один байт из первого потока, затем один байт из второго и т. д. по кругу.

Одно из наиболее важных отличий синхронной от плезиохронной иерархии - это возможность выделения нужного канала вплоть до уровня Е-1 без демультиплексирования всего транспортного сигнала. Это привело к появлению принципиально иного типа мультиплексоров - мультиплексоров с добавлением и выделением отдельных каналов (в английской терминологии - add-drop multiplexer, а в русской технической литературе их кратко называют мультиплексорами ввода/вывода).

Кроме того, многие мультиплексоры стали выполнять и функции кроссовой коммутации (впрочем, может быть и наоборот, но это уже спор о курице и яйце). Мультиплексоры с кроссовой коммутацией (cross-connect multiplexor) позволяют осуществлять концентрацию и разделение потоков (функции мультиплексирования и демультиплексирования) наряду с переключением цифровых сигналов с одного канала на другой в соответствии с определенными правилами (функции коммутации).

Качественно новым этапом в развитии цифровых систем передачи явилось создание в 1989 г. синхронной цифровой иерархии - СЦИ (или Synchronous Digital Hierarchy - SDH).

Передача информации в СЦИ сочетается с функцией контроля, управления и обслуживания (Operation, Administration and Management - OAM), что достигается введением в состав оборудования систем передачи компьютеров и соответствующих интерфейсных, контрольных и исполнительных устройств, имеющих доступ к соответствующим составляющим цифрового потока, элементов сети связи и называется *транспортированием*. Иными словами, СЦИ представляет набор унифицированных цифровых структур с целью транспортирования по физическим цепям необходимым образом адаптированных стандартных цифровых потоков.

Системы передачи СЦИ рассчитаны на транспортирование цифровых потоков (сигналов) ПЦИ различных стандартов и уровней, а также широкополосных сигналов, связанных с внедрением новых услуг электросвязи. Для каждого уровня СЦИ стандартизированы скорости передачи группового цифрового сигнала и структуры циклов.

Для первого уровня СЦИ установлена скорость передачи 155,52 Мбит/с. Скорости высших уровней получаются умножением скорости первого уровня на число, соответствующее наименованию уровня. Уровни СЦИ приведены в таблице 5.2.

Для передачи информации с вышеприведенными уровнями скоростей в СЦИ используются информационные блоки, называемые синхронными транспортными модулями (Synchronous Transport Module -STM), которые

представляют собой блочную циклическую структуру с периодом повторения $T_ц$ = 125 мкс.

Кроме информационной нагрузки, STM несут значительный объем избыточных сигналов, обеспечивающих функционирование OAM, и др.

Исходной информационной нагрузкой для STM-N (N - порядок STM, N=1, 4, 16, 64, 256) являются цифровые потоки ПЦИ со скоростями передачи (округленно) 2, 34 и 140 Мбит/с европейского стандарта ПЦИ и 1,5, 6,0 и 45 Мбит/с североамериканского стандарта ПЦИ.

Таблица 5.2 - Уровни СЦИ

Уровень иерархии	Синхронная цифровая иерархия	
	Обозначения	Скорости передачи, Мбит/с
Первый	STM-1	155,52=155
Четвертый	STM-4	155,52x4 = 622,08 = 622
Шестнадцатый	STM-16	155,52 x 16 = 2488,32 = 2500
Шестьдесят четвертый	STM-64	155,52 x 64 = 9953,28 × 10000
Двести пятьдесят шестой	STM-256	155,52 x 256 = 39813,12 × 40000

В качестве основного формата в СЦИ принят синхронный транспортный модуль - СТМ (или Synchronous Transport Modul - STM), имеющий скорость передачи 155,52 Мбит/с и включающий в себя цифровые потоки европейского и североамериканского стандартов ПЦИ.

Синхронный транспортный модуль представляет собой блочную циклическую структуру с периодом повторения 125 мкс. Основной модуль STM-1, модули высших уровней STM-4, STM-16, STM-64 и STM-256, кроме основной информационной нагрузки, несут значительный объем избыточных сигналов, обеспечивающих функции контроля, управления и обслуживания, а также ряд вспомогательных функций.

Структурная схема временного группообразования или мультиплексирования для STM-N потоков ПЦИ европейского и североамериканского стандартов приведена на рисунке 5.2.

Исходная информационная нагрузка (потоки PDH E1, E3 и E4 европейского стандарта и DS1, DS2 и DS3 американского стандарта) пакуется в контейнеры C (Container) соответствующего уровня, представляющие базовые элементы структуры мультиплексирования SDH, соответствующие уровням ПЦИ. Рассмотрим пример формирования синхронного транспортного модуля N-го уровня.

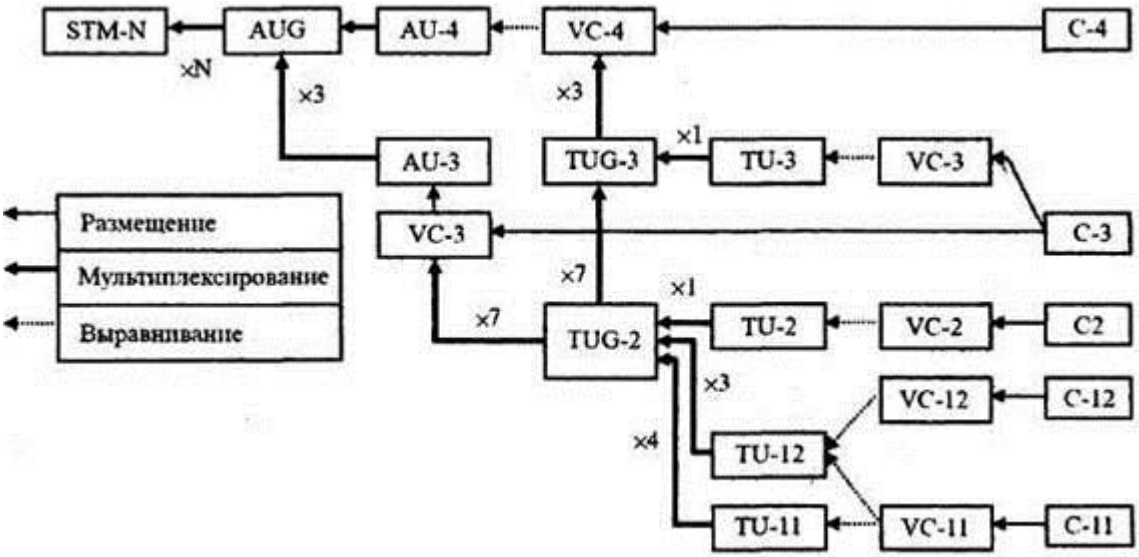


Рисунок 5.2 - Схема преобразований в синхронной цифровой иерархии

Четверичный цифровой поток европейского стандарта Е4 со скоростью передачи 140 Мбит/с, что соответствует 2176 байтам на длительности цикла $T_ц$ = 125 мкс, путем добавления выравнивающих байт преобразуется в контейнер уровня С-4; третичный цифровой поток Е3 с числом 537 байт на длительности $T_ц$ = 125 мкс путем добавления выравнивающих байт преобразуется в контейнер уровня С-3. Аналогично цифровой поток североамериканского стандарта ПЦИ уровня DS3 со скоростью передачи 45 Мбит/с преобразуется также в контейнер уровня С-3. Первичный цифровой поток Е1 путем добавления выравнивающих бит преобразуется в контейнер типа С-12, а североамериканский DS1 - в контейнер С-11. Затем контейнеры С-4, С-3, С-12 или С-11 посредством операции размещения преобразуются в виртуальные контейнеры VC (Virtual Container - VC) соответствующего уровня с периодом 125 или 250 мкс. Виртуальный контейнер VC получается из контейнера С путем добавления в структуру последнего байт трактового заголовка POH (Path Over Head), обеспечивающего контроль качества тракта и передачу аварийной и эксплуатационной информации. Условно операция размещения заключается в том, что информация, содержащаяся в контейнере С, размещается на определенных позициях виртуального контейнера, чередуясь с битами трактового заголовка.

Для европейского стандарта СЦИ имеют место следующие типы виртуальных контейнеров:

1) VC-12, содержащий контейнер С-12 и трактовый заголовок - POH, который путем выравнивания, заключающегося в добавлении байт указателя PTR (PoinTeR - указатель), преобразуется в компонентный блок уровня TU-12 (Tributary Unit - TU).

2) VC-3 - виртуальный контейнер высшего уровня, содержащий контейнер С-3, трактовый заголовок - POH, и далее выравниванием и

добавлением байт указателя PTR преобразуется в компонентный блок уровня TU-3.

3) VC-4 - виртуальный контейнер высшего уровня, содержащий контейнер C-4 и трактовый заголовок, который путем выравнивания и добавления байт PTR преобразуется в административный блок AU-4 (Administrative Unit - AU).

Соответствующим мультиплексированием с коэффициентами мультиплексирования, равными 3, 7 и 1, формируются группы компонентных блоков TUG (Tributary Unit Group) второго TUG-2 и третьего (высшего) TUG-3 уровней.

Как следует из рисунка 5.2, виртуальный контейнер VC-4 формируется либо на основе контейнера C-4, либо путем мультиплексирования с коэффициентом мультиплексирования, равным 3, из компонентных блоков TUG-3. Виртуальный контейнер VC-4 преобразуется в административный блок AU-4, а последний с помощью мультиплексирования преобразуется в группу административных блоков AUG.

Процесс формирования синхронного транспортного модуля уровня N, т.е. STM-N (где N=1, 4, 16 и 64) может быть условно представлен формулой:

$$STM\text{-}N = AUG\text{-}N + SOH,$$

где AUG-N - группа административных блоков порядка N;

SOH -Section Over Head - секционный заголовок, состоящий из двух частей: заголовка регенерационной секции или RSOH - Regeneration Section Over Head и заголовка мультиплексной секции или MSON - Multiplex Section Over Head.

Секцией СЦИ называется комплекс технических средств, предназначенный для передачи нормализованных синхронных транспортных модулей с соответствующей скоростью передачи.

Секция СЦИ начинается (заканчивается) в месте формирования (удаления) заголовков SOH. Секция может быть регенерационной или мультиплексной.

Секционный заголовок - часть цикла STM-N, несущая информацию цикловой синхронизации, служебной связи, каналов системы обслуживания, каналов пользователя, качества секции и т.п.

Следовательно, заголовок регенерационной секции RSOH передается между регенераторами и выполняет функции цикловой синхронизации, контроля ошибок, указания порядка STM, создания канала передачи данных, служебной связи. Заголовок мультиплексной секции MSOH передается между точками доступа, в которых формируется и расформировывается VC, и выполняет функции контроля ошибок, создания канала управления автоматическим переключением на резерв, передачи данных и служебных связей различного назначения.

Рассмотрим основные этапы формирования синхронного транспортного модуля STM-1 на основе компонентных цифровых потоков плезиохронной цифровой иерархии различных стандартов.

Новая цифровая иерархия была задумана как скоростная информационная автострада 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 потоков был выбран синхронный, то данная иерархия получила название синхронной цифровой иерархии (Synchronous Digital Hierarchy - SDH).

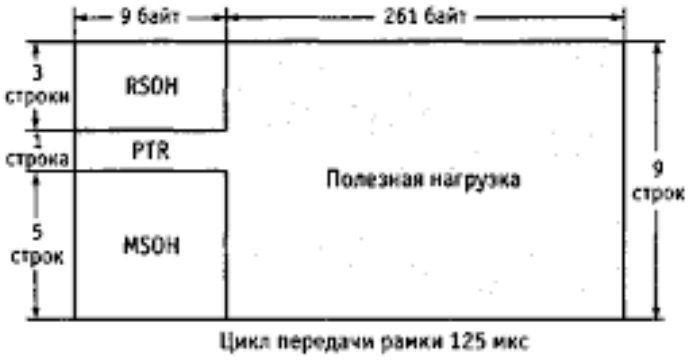


Рисунок 5.3 - Структура синхронного транспортного модуля STM-1

Для транспортирования цифрового потока со скоростью 155 Мбит/с создается синхронный транспортный модуль STM-1. Его упрощенная структура дана на рис. 5.3. Модуль представляет собой фрейм (рамку)

$$9 \cdot 270 = 2430 \text{ байт.}$$

Кроме передаваемой информации, он содержит в 4-й строке указатель (Pointer, PTR), определяющий начало записи полезной нагрузки.

Чтобы определить маршрут транспортного модуля, в левой части рамки записывается секционный заголовок (Section Over Head -SOH).

Нижние $5 \cdot 9 = 45$ байтов (после указателя) отвечают за доставку информации в то место сети, к тому мультиплексору, где этот транспортный модуль будет переформировываться.

Данная часть заголовка так и называется: секционный заголовок мультиплексора (MSOH). Верхние $3 \cdot 9 = 27$ байтов, до указателя представляют собой секционный заголовок регенератора (RSOH), где будут осуществляться восстановление потока, «поврежденного» помехами, и исправление ошибок в нем.

Один цикл передачи включает в себя считывание в линию такой прямоугольной таблицы. Порядок передачи байтов - слева направо, сверху вниз.

Продолжительность цикла передачи STM-1составляет 125 мкс, т.е. он повторяется с частотой 8 кГц. Каждая клеточка соответствует скорости передачи 8 бит · 8 кГц = 64 кбит/с.

Значит, если тратить на передачу в линию каждой прямоугольной рамки 125 мкс, то за секунду в линию будет передано:

$$9 \cdot 270 \cdot 64 \text{ Кбит/с} = 155520 \text{ Кбит/с, т.е. } 155 \text{ Мбит/с.}$$

Для создания более мощных цифровых потоков в SDH-системах формируется следующая скоростная иерархия:

- 4 модуля STM-1 объединяются путем побайтового мультиплексирования в модуль STM-4, передаваемый со скоростью 622,080 Мбит/с;
- затем 4 модуля STM-4 объединяются в модуль STM-16 со скоростью передачи 2488,320 Мбит/с;
- наконец 4 модуля STM-16 могут быть объединены в высокоскоростной модуль STM-64 (9953,280 Мбит/с).

Наиболее близким по скорости к первому уровню иерархии SDH (155,520 Мбит/с) является цифровой поток со скоростью 139,264 Мбит/с, образуемый на выходе аппаратуры плезиохронной цифровой иерархии ИКМ-1920.

Его проще всего разместить в модуле STM-1. Для этого поступающий цифровой сигнал сначала «упаковывают» в контейнер, который обозначается С-4.

Рамка контейнера С-4 содержит 9 строк и 260 однобайтовых столбцов. Добавляется слева еще один столбец - маршрутный или трактовый заголовок (Path Over Head - POH) и тогда - этот контейнер преобразуется в виртуальный контейнер VC-4.

Наконец, чтобы поместить виртуальный контейнер VC-4 в модуль STM-1, его снабжают указателем (PTR), образуя таким образом административный блок AU-4 (Administrative Unit), а последний помещают непосредственно в модуль STM-1 вместе с секционным заголовком SOH (рисунок 5.4).

Синхронный транспортный модуль STM-1 можно загрузить и плезиохронными потоками со скоростями 2,048 Мбит/с. Такие потоки формируются аппаратурой ИКМ-30, они широко распространены в современных сетях. Для первоначальной «упаковки» используется контейнер С12. Цифровой сигнал размещается на определенных позициях этого контейнера.

Путем добавления маршрутного, или транспортного, заголовка (POH) образуется виртуальный контейнер VC-12. Виртуальные контейнеры формируются и расформировываются в точках окончаниях трактов.

В модуле STM-1 можно разместить 63 виртуальных контейнера VC-12. При этом поступают следующим образом. Виртуальный контейнер VC-12 снабжают указателем (PTR) и образуют тем самым транспортный блок TU-12 (Tributary Unit). Теперь цифровые потоки разных транспортных блоков можно объединять в цифровой поток 155,520 Мбит/с.

Сначала три транспортных блока TU-12 путем мультиплексирования объединяют в группу транспортных блоков TUG-2 (Tributary Unit Group), затем семь групп TUG-2 мультиплексируют в группы транспортных блоков TUG-3, а три группы TUG-3 объединяют вместе и помещают в виртуальный контейнер VC-4. Далее путь преобразований известен.

Плезиохронные цифровые потоки всех уровней размещаются в контейнерах С с использованием процедуры выравнивания скоростей.

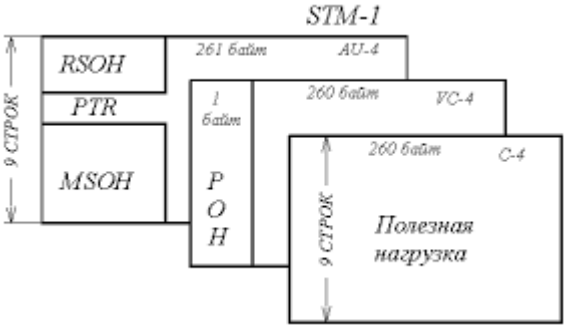


Рисунок 5.4 - Размещение контейнеров в модуле STM-1

Наличие большого числа указателей (PTR)позволяет совершенно четко определить местонахождение в модуле STM-1 любого цифрового потока со скоростями 2,048; 34,368 и 139,264 Мбит/с. Выпускаемые промышленностью мультиплексоры ввода-вывода позволяют ответвлять и добавлять любые цифровые потоки.

Как и в ПЦИ, на каждом уровне СЦИ стандартизированы скорости передачи группового сигнала и структуры циклов. МСЭ-Т принял рекомендации по следующим уровням:

- первый уровень со скоростью передачи 155,52 Мбит/с;
- четвертый уровень со скоростью передачи 622,08 Мбит/с; шестнадцатый уровень со скоростью передачи 2488,32 Мбит/с.

Скорости соответствующих уровней получаются умножением скорости первого уровня на число, соответствующее наименованию уровня.

В качестве основного формата сигнала в СЦИ принят синхронный транспортный модуль- СТМ, имеющий скорость передачи 155,52 Мбит/си включающий в себя цифровые потоки европейского и североамерикан-скогостандартов ПЦИ. Синхронный транспортный модуль представляет собой блочную циклическую структуру с периодом повторения 125 мкс.

Основной модуль STM-1, модули высших уровней STM-4, STM-16, STM-64 и STM-256 кроме основной информационной нагрузки, несут значительный объем избыточных сигналов, обеспечивающих функции контроля, управления и обслуживания и ряд вспомогательных функций.

Таким образом, рассмотрены основные технологии мультиплексирования, применяемые в телекоммуникационных сетях.

5.3 Обобщенная структурная схема волоконно-оптической системы передачи

5.3.1 Классификация ВОСП.

Существует разнообразная классификация ВОСП, но в основном применяется следующая:

1) ВОСП в зависимости от применяемого каналообразующего оборудования делятся на:

- аналоговые волоконно-оптические системы передачи (АВОСП), если каналообразующее оборудование строится на основе аналоговых методов модуляции параметров гармонической несущей частоты (амплитудная, частотная, фазовая модуляции и их комбинации) или параметров периодической последовательности импульсов (амплитудно-импульсная, широтно-импульсная, фазоимпульсная модуляции и их комбинации);
- цифровые волоконно-оптические системы передачи (ЦВОСП), если каналообразующее оборудование строится на основе импульсно-кодовой модуляции, дельта-модуляции и их разновидностей; самое широкое применение находят ЦВОСП.

2) ВОСП в зависимости от способа модуляции оптического излучения подразделяются на:

- волоконно-оптические системы передачи с модуляцией интенсивности оптического излучения и соответствующей его демодуляции, называемые иногда прямой модуляцией и широко применяемой в большинстве ЦВОСП;
- волоконно-оптические системы передачи с аналоговыми методами модуляции оптического излучения (оптической несущей): амплитудной, фазовой, частотной модуляциями и их комбинациями.

3) ВОСП в зависимости от способа приема или демодуляции оптического сигнала подразделяются на:

- волоконно-оптические системы передачи с прямой демодуляцией или непосредственным приемом, при котором происходит непосредственное преобразование интенсивности оптического излучения в электрический сигнал, напряжение или ток которого однозначно отражают изменение интенсивности оптического сигнала;
- когерентные волоконно-оптические системы передачи, в которых применяется гетеродинное или гомодинное преобразование частоты независимо от вида модуляции (синхронная или несинхронная) оптического излучения, осуществляемое на промежуточной частоте.

При гетеродинном приеме одновременно с оптическим сигналом частоты f_c на фотодетектор подается достаточно мощное оптическое излучение местного гетеродина с частотой f_r, на выходе фотодетектора выделяется промежуточная частота $f_{прогNi} = f_c - f_r$, на которой и осуществляются дальнейшие пребразования оптического сигнала в электрический.

При гемодинном методе приема частоты колебаний принимаемого оптического излучения и местного гетеродина должны быть одинаковыми ($f_c = f_r$), а фазы синхронизированы.

4) По способу организации двусторонней связи ВОСП подразделяются на:

- двухволоконную однополосную однокабельную, при которой передача и прием оптических сигналов ведутся по двум оптическим волокнам (ОВ) и осуществляются на одной длине волны L Каждое 0В является эквивалентом двухпроводной физической цепи и, так как взаимные влияния между оптическими волокнами кабеля отсутствуют, то тракты передачи и приема различных систем организуются по одному кабелю, т.е. такие ВОСП являются однокабельными однополосными.

Принцип построения двухволоконной однокабельной однополосной ВОСП показан на рисунке 5.5, где приняты обозначения:

- КОО - каналообразующее оборудование;
- ОС - оборудование сопряжения;
- ОПер - оптический передатчик;
- ОВ - оптическое волокно;
- Опр - оптический приемник;

Достоинством такой ВОСП является использование однотипного оборудования трактов передачи и приема оконечных и промежуточных станций, а недостатком - весьма низкий коэффициент использования пропускной способности ОВ;

- одноволоконную однополосную однокабельную (рисунок 5.6), особенностью которой является использование одного оптического волокна для передачи сигналов в двух направлениях на одной и той же длине волны; на рисунке 5.6 - 3 к ранее принятым обозначениям добавились следующие:

ОРУ - оптическое развязывающее устройство, осуществляющее поляризацию световых волн или разделение типов направляемой волны оптического излучения;

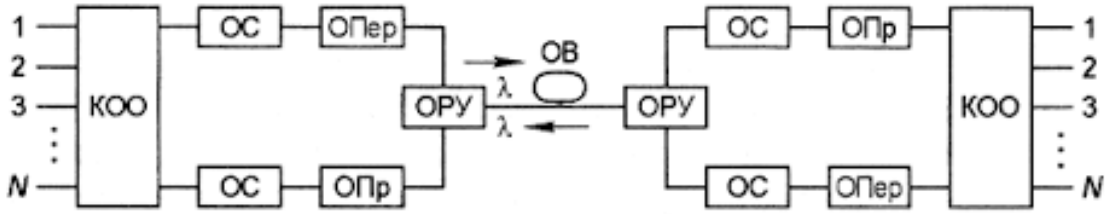


Рисунок 5.5 - Принцип построения двухволоконной однополосной однокабельной ВОСП

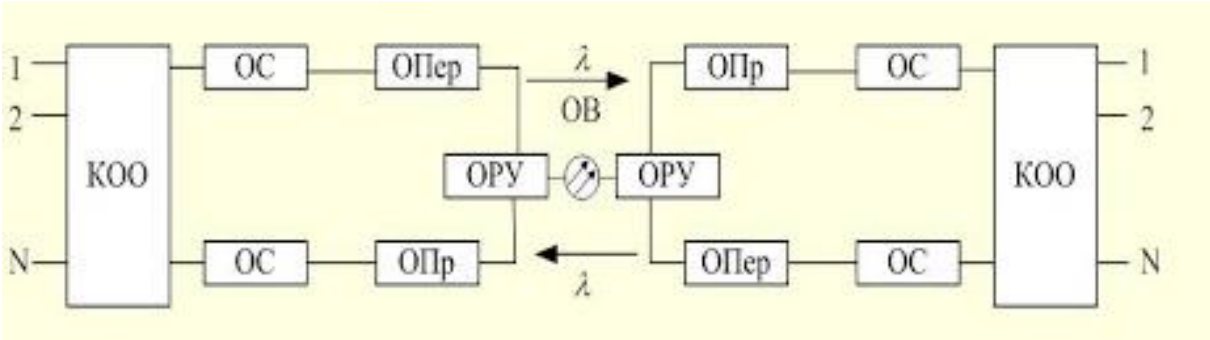


Рисунок 5.6 - Принцип построения одноволоконной однополосной однокабельной

- одноволоконную двухполосную однокабельную, при которой передача в одном направлении ведется на длине волны оптического излучения λ_1 а в другом - λ_2 разделение направлений передачи осуществляется с помощью направляющих оптических фильтров (ОФ), настроенных на соответствующие длины волн оптического излучения; обобщенная схема такого способа организации двусторонней связи приведена на рисунке 5.6, здесь ОФ - направляющие оптические фильтры, выделяющие соответствующие длины волн.

5) По назначению и дальности передачи ВОСП подразделяются на:

- магистральные ВОСП, предназначенных для передачи сообщений на тысячи километров и соединяющих между собой центры республик, краев, областей, крупные промышленные и научные центры и др.;

- зоновые ВОСП, предназначенные для организации связи в административных пределах республик, краев, областей и протяженностью до 600 км;

- ВОСП для местных сетей, предназначенные для организации межстанционных соединительных линий на городских и сельских телефонных сетях;

- ВОСП для распределения информации, обеспечивающие связь между вычислительными машинами, организацию локальных компьютерных сетей и сетей кабельного телевидения.

6) По методам уплотнения оптического волокна, в основе которых лежит процесс мультиплексирования, т.е. одновременной передачи нескольких потоков светового излучения по одному волокну, ВОСП подразделяются на:

- ВОСП со спектральным уплотнениемили мультиплексированием с разделением длин волн (wavelength - division multiplexing, WDM), при котором по одному ОВ одновременно передается несколько спектрально разнесенных оптических несущих, каждая из которых модулируется многоканальный сигналом, сформированным соответствующим каналообразующим оборудованием. Возможность построения таких систем основывается на сравнительно слабой зависимости коэффициента затухания

ОВ в пределах соответствующего окна прозрачности от частоты (или длины волны) оптической несущей. Поэтому, применяя метод частотного разделения, по одному ОВ можно организовать несколько широкополосных оптических каналов, увеличив тем самым результирующую скорость передачи информации. Структурная схема ВОСП со спетральным разделением оптических каналов показана на рисунке 5.7, где к уже принятым обозначениям добавляются новые:

ОФМС - оборудование формирования многоканального сигнала, представляющего совокупность каналообразующего оборудования (КОО) и оборудования сопряжения (ОС), предназначенного для формирования электрического сигнала, параметры которого согласованы с оптическим передатчиком (ОПер) и оптическим приемником (ОПр);

УСО (или MUX - мультиплексор WDM) - устройство спектрального объединения, осуществляющее ввод различных оптических несущих в одно оптическое волокно (ОВ); УСР (или DMUX - демультиплексор WDM) - устройство спектрального разделения, где оптические несущие разделяются в пространстве и поступают на оптические приемники..

На передающей станции имеется п систем передачи, сигналы которых подаются на п оптических передатчиков, излучающих различные оптические несущие $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_к$.

С помощью УСО осуществляется ввод различных несущих в ОВ. На приемной стороне в УРС оптические несущие разделяются и подаются на оптические приемники и далее на ОФМС. Таким образом, по одному ОВ организуется п спектрально разделенных оптических каналов, т.е. пропускная способность ОВ увеличивается в л раз по сравнению с традиционным построением оптических систем передачи.

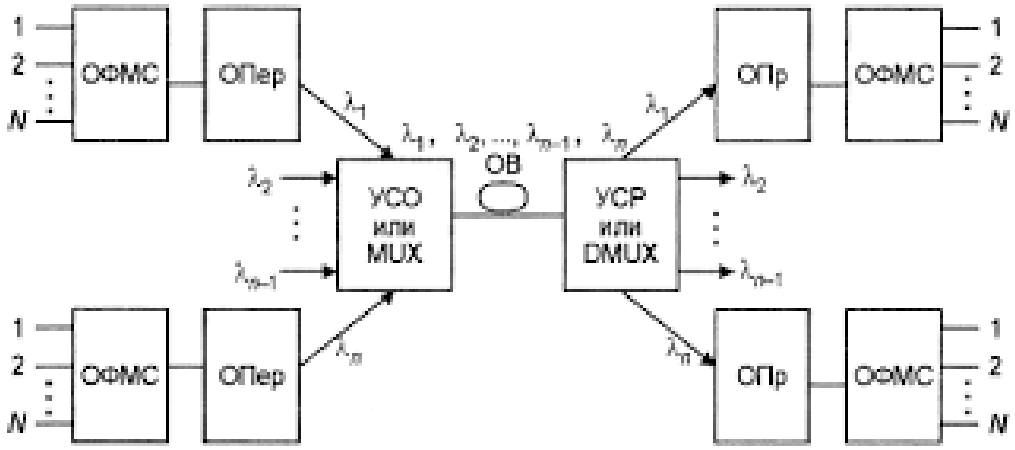


Рисунок 5.7 - Структурная схема ВОСП со спектральным разделением

Кроме того, этот метод позволяет обеспечить развитие сетей связи без проведения дополнительных строительных работ, а также создавать разветвленные сети любой структуры с пассивными элементами

спектрального уплотнения в местах разделения или выделения световых потоков. При этом расширяются возможности передачи различных сигналов (телефонии, телевидения, телеметрии, передачи данных и др.) с различными скоростями или шириной полосы частот и типами модуляции --цифровой и аналоговой. Все это обеспечивает создание экономичных многофункциональных телекоммуникационных систем и сетей.

Для объединения и разделения оптических несущих могут использоваться различные оптические спектральные устройства: мультиплексоры, демультиплексоры, работа которых основана на явлениях физической оптики: дисперсия, дифракция и интерференция. В основе структуры мультиплексоров и демультиплексоров может быть оптическая призма, многослойный диэлектрик, дифракционная решетка и др.;

- ВОПС с частотным или гетеродинным уплотнением. В системах передачи с частотным мультиплексированием исходным многоканальным сигналам различных источников в линейных трактах отводятся определенные полосы частот. Поэтому для получения близко расположенных спектральных каналов в ВОСП используются различные несущие не от разных источников, а от одного, но достаточно стабильного, с помощью соответствующего сдвига оптической несущей. Уплотнение, использующее такой принцип формирования оптических несущих, называется частотным или гетеродинным уплотнением. Структурная схема, поясняющая принцип формирования группового оптического сигнала, приведена на рисунке 5.8. Оптическое излучение с выхода источника оптического излучения (ИИ), содержащего ряд несущих $f_1, f_2, ..., f_N$ поступает на анализатор A_1, представляющий собой спектральную призму Глана-Тейлора, а затем, пройдя четвертьволновую призму, $\lambda/4$ - на фильтр первого канала $Ф_i$ Это фильтр пропускает оптическую несущую первого канала f_1 к оптическому модулятору $ОМ_Ь$ где она и модулируется информационным оптическим сигналом (ОС»). Оптическое излучение с частотами $f_1, f_2, ..., f_N$ отражается фильтром и возвращается к анализатору Л». По пути оно вторично проходит через четверть волновую призму и попадает на анализатор A_2. Оптическая несущая первого канала, промодулированная в $ОМ_1$ информационным сигналом, отражаясь от зеркала, также возвращается к анализатору A_f.

Плоскость поляризации оптического сигнала, дважды прошедшего четвертьволновую призму, поворачивается на $\pi/2$ по отношению к плоскости поляризации исходного колебания, в связи с чем световой пучок отклоняется в призме и выходит из нее. Далее общий сигнала поступает на анализатор A_2 и процесс повторяется, с той лишь разницей, что модулируется оптическое излучение с частотой f_2. Таким образом, формируется оптический групповой сигнал, поступающий в оптическое волокно кабеля.

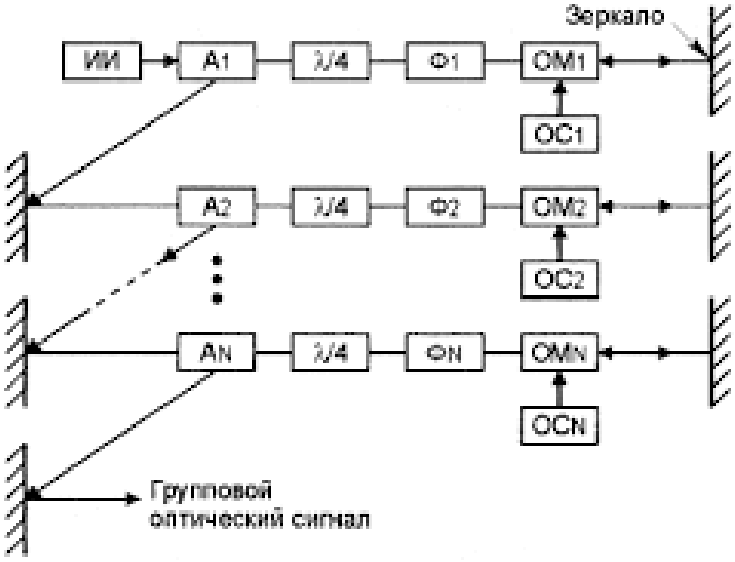


Рисунок 5.8 - Схема формирования оптического группового сигнала при частотном (гетеродинном) уплотнении

Принимаемый групповой оптический сигнал, содержащий ряд промодулированных оптических несущих, поступает на анализатор A_1 (рисунок 5.10), а затем после прохождения через четвертьволновую призму и фильтр первого канала - на оптический смеситель (ОСМ).

Фильтр $Ф_1$ пропускает только оптический сигнал с несущей частотой f_b сигнал с другими частотами отражается и поступает на $A_г$. Оптическая промодулированная несущая частота перемножается в ОМС с частотой местного гетеродина (Гет), затем промежуточная частота $f_{пром}$ выделяется полосовым фильтром (ПФ) и поступает на фотодетектор (ФД), на выходе которого формируется электрический информационный сигнал. Таким образом, прием осуществляется гетеродинным способом. Аналогично происходит детектирование сигнала во всех остальных каналах.

Достоинство метода частотного (гетеродинного) уплотнения заключаются в том, что длина регенерационного участка регенерации за счет гетеродинного приема возрастает до 200 км и значительно повышается коэффициент использования пропускной способности ОВ. Недостатками данного метода является то, что требуется оптический тракт приема и передачи с сохранением поляризации, а также ряд дополнительных устройств: сдвигателей частоты, оптических вентилей, контроллеров поляризации, оптических усилителей, систем автоподстройки частоты и т.п., что значительно усложняет и увеличивает стоимость ВОСП.

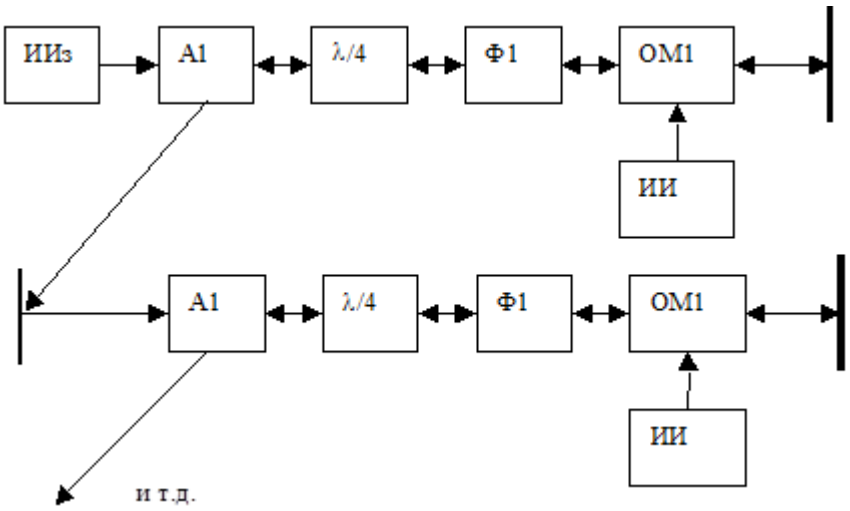


Рисунок 5.9 - Схема приема группового оптического сигнала при частотном (гетеродинном) уплотнении

- ВОСП с временным уплотнением (с временным мультиплексированием), при котором несколько информационных или компонентных потоков объединяются в один, и для передачи каждого компонентного потока по одному ОВ отводится свой временной интервал. Объединение может быть осуществлено на уровне электрических сигналов и на уровне оптических сигналов. Временное мультиплексирование на уровне электрических сигналов приведено на рис 5.11, где приняты следующие обозначения: 1...N - источники компонентных информационных потоков, представляющих многоканальные электрические сигналы; MUX - временной мультиплексор, который, создавая групповой электрический сигнал, последовательно подключает компонентные многоканальные электрические сигналы к общему оптическому передатчику (ОПер) на определенный временной интервал; ОВ - оптическое волокно; ОПр - оптический приемник, преобразующий оптический сигнал в групповой электрический, содержащий N компонентных многоканальных электрических сигналов; DMUX - временной демультиплексор, распределяет принятые компонентные многоканальные электрические сигналы по соответствующим приемникам 1...N. Мультиплексор и демультиплексор должны работать синхронно.

Отметим, что компонентные информационные потоки могут быть сформированы как на основе систем передачи с частотным разделением каналов, так и на основе систем передачи на основе импульсных и цифровых методов модуляции.

Схема с временным мультиплексированием на уровне оптических сигналов приведена на рисунке 5.11, где приняты следующие обозначения:

- $ОПер_{1...N}$- оптические передатчики 1...N компонентных информационных потоков (многоканальных электрических сигналов аналоговых или цифровых, преобразованных в оптические сигналы);

- OMUX - оптический мультиплексор, осуществляющий задержку оптического сигнала от каждого ОПер на величину $\Delta\tau, 2\Delta\tau, ..., N\Delta\tau$ (здесь N - число компонентных информационных потоков или многоканальных оптических сигналов), объединяющий N многоканальных оптических сигналов в групповой оптический поток и направляющий его в оптическое волокно (ОВ);

- ODMUX - оптический демультиплексор, осуществляющий на приеме обратные преобразования.

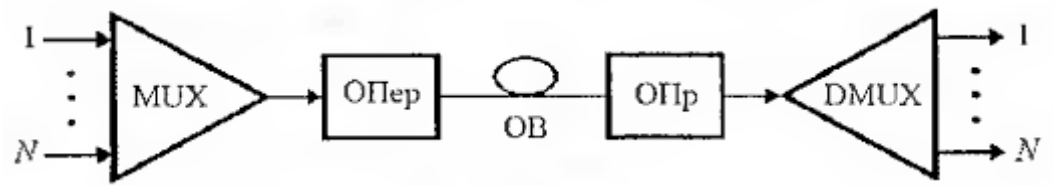


Рисунок 5.10 - Временное мультиплексирование на уровне электрических сигналов

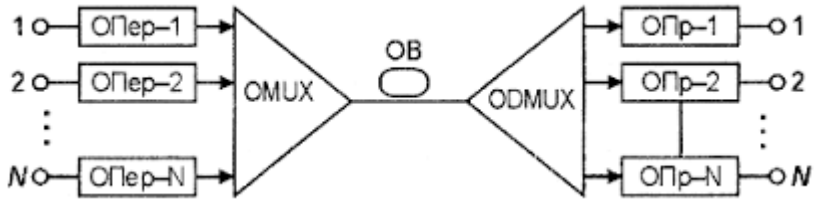


Рисунок 5.11 - Временное мультиплексирование на уровне оптических сигналов

При временном мультиплексировании как на уровне электрических сигналов, так и на уровне оптических, требуется передача коротких (наносекундных) световых импульсов. Однако передача субнаносекундных импульсов предъявляет чрезвычайно высокие, близкие к предельным, требования к быстродействию оптоэлектронных компонентов оптических передатчиков и приемников ВОСП. Кроме того, скорость передачи или широкополосность оптических трактов ограничивается дисперсионными свойствами ОВ.

Основными достоинствами временного мультиплексирования являются увеличение коэффициента использования пропускной способности ОВ (уже достигнуты скорости передачи до 16 и выше Гбит/с) и возможность создания полностью оптической сети связи.

5.4 Особенности передачи электромагнитных колебаний по оптическому кабелю

Основными источниками внешних электромагнитных воздействий на оптические кабели являются грозовые разряды, высоковольтные линии

электропередачи и электрические железные дороги. Наиболее опасными являются грозовые разряды.

5.4.1 Грозовые разряды.

5.4.1.1 Характеристика грозовых разрядов. По характеру возникновения грозы бывают тепловые и фронтальные. Тепловая гроза носит локальный характер, и возникает обычно в холмистой местности или в предгорьях. При нагреве склона холма солнцем тёплый воздух устремляется вверх (рисунок 5.12), а на его место затекает холодный воздух, при этом в области соприкосновения холодного и тёплого воздуха происходит конденсация влаги.

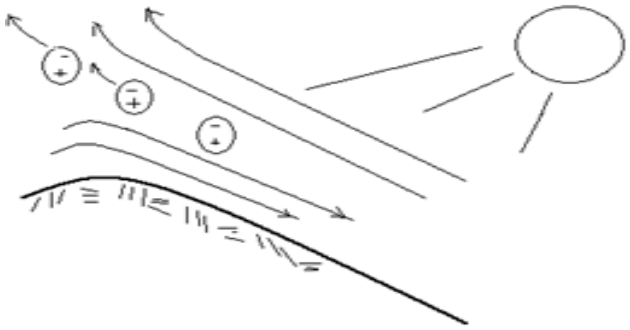


Рисунок 5.12 - Появление восходящих потов воздуха с конденсацией влаги

С точки зрения электростатики Земля представляет собой шар, заряженный отрицательно. На высоте примерно 60-70 км находится ионизованный слой атмосферы (иногда называемый слоем Кеннели-Хивисайда), заряженный положительно. Этот слой появляется в результате ультрафиолетового излучения Солнца. Таким образом, возникает шаровой конденсатор и электрическое поле, направленное от ионизованного слоя к поверхности земли. Это так называемое «поле ясной погоды» (рисунок 5.13).

Рисунок. 5.13 - Поле ясной погоды

Величина напряжённости поля у поверхности Земли равна примерно 120 В/м, однако мощность поля мала и вреда живым организмам оно не приносит, но зато играет существенную роль в формировании грозового облака. Капли в стремительно восходящем потоке воздуха электризуются, дробятся, захватывают имеющиеся в воздухе свободные электроны. Тяжёлые

положительные ионы оседают к поверхности Земли. В результате образующееся облако, как правило, имеет отрицательный заряд. Возникает направленное от земли к облаку электрическое поле, величина которого может достигать нескольких сотен кВ/м. Вследствие небольшой непрерывной деформации облака в некоторых точках, где величина поля максимальна, начинается процесс развития разряда по направлению к земле.

Этот процесс носит ступенчатый характер: под действием сильного поля электроны ускоряются, излучают в направлении движения, образуются новые ионизованные области, которые постепенно сливаются. Канал наполняется зарядами из ближайших областей облака. И таким образом, разряд скачками продвигается к земле. Когда он достигает поверхности земли, начинается бурный процесс нейтрализации зарядов, сопровождаемый выделением энергии, ярким свечением и разогревом канала до нескольких тысяч градусов. Нагретые в объёме канала газы расширяются со сверхзвуковой скоростью, что является причиной грома.

5.4.1.2 Воздействие молнии на оптический кабель связи с металлическими элементами в конструкции.

Оптические кабели могут иметь металлическую оболочку или броню для защиты от механических повреждений при прокладке в каменистых, скальных или мёрзлых грунтах, упрочняющие металлические элементы, а также жилы дистанционного питания.

При ударе молнии в землю или в деревья вблизи трассы подземного кабеля часть или весь ток молнии может попасть в металлическую оболочку кабеля. При этом дуговой разряд, возникающий между точкой удара и кабелем, перекрывает расстояние в нескольких десятков метров. Влага, содержащаяся в объёме канала разряда, практически мгновенно испаряется, так как температура в канале разряда составляет сотни и даже тысячи градусов. Фронт расширяющихся паров и газов вблизи разряда создаёт давление порядка 1000 кг/см^2, которое сминает оболочку кабеля ещё до попадания туда тока молнии. При этом на оболочке может не возникать ни малейших следов оплавления. Это так называемый электрогидравлический эффект. Он в сильной степени зависит от амплитуды тока, его крутизны и влажности грунта.

В случае пологой формы импульса тока возникает теплоотвод и возможно оплавление оболочки. При дальнейшем протекании тока молнии по металлической оболочке кабеля вследствие разницы в параметрах распространения импульсов по земле и по цепи оболочка – земля между металлическими элементами оптического кабеля и землёй возникает напряжение, амплитуда которого достигает нескольких тысяч вольт.

В результате чего происходит пробой внешнего шланга или изоляции между металлическими элементами конструкции кабеля. Во время искрового или дугового пробоя могут пострадать расположенные рядом волокна, а через образовавшееся отверстие пробоя начнёт постепенно проникать влага.

Амплитуда возникающего напряжения зависит от величины электрического сопротивления оболочки и удельного сопротивления окружающей земли. В принципе данный механизм повреждения оптического кабеля с металлическими элементами мало чем отличается от механизма повреждения при грозе обычного электрического кабеля с металлическими жилами.

Повреждения изоляции при распространении тока по оболочке могут происходить не только вблизи точки удара молнии, но и на значительном расстоянии от неё вдоль кабеля (до нескольких километров), особенно в местах с ослабленной изоляцией или в точках с механическими повреждениями наружного пластмассового шланга.

При одном и том же ударе молнии возможны десятки повреждений изоляции кабеля на расстоянии от нескольких до сотен метров друг от друга и от точки входа тока в оболочку кабеля.

Грозовые повреждения электрических кабелей связи в металлической оболочке в среднем составляют величину порядка 10 % - 13 % от всех повреждений кабелей исходя из грозодеятельности, геологических и географических условий, типа кабеля, способа прокладки и т.п. Очевидно, что грозовые повреждения оптических кабелей с металлическими жилами и оболочкой также будут составлять примерено такую же цифру. В случае если кабель имеет только металлическую оболочку без жил дистанционного питания, то наиболее вероятны повреждения шланга с последующим постепенным проникновением влаги внутрь конструкции. Это необязательно влечёт за собой немедленный выход кабеля из строя с перерывом связи, но значительно снижает его надёжность.

Существует минимальный ток молнии J, который при ударе молнии в землю приводит к образованию электрической дуги от точки удара молнии к кабелю и возникновению повреждения. Этот ток зависит от удельного сопротивления земли в месте прокладки кабеля, поверхностной электрической прочности грунта однородности строения грунта и равномерности электрического поля, расстояния до кабеля, а также от свойств самого кабеля.

В реальных условиях ток молнии в кабель может попасть и через элементы окружающей инфраструктуры: монтажных устройств и соединительных элементов или посторонних металлических конструкций.

На практике наиболее часто дуга разряда возникает после удара молнии в высокие деревья, и далее по поверхности земли (так как поверхностное пробивное напряжение меньше, чем в объёме) или иногда по корням дерева до кабеля. Это расстояние в среднем составляет 25-30 метров, но может достигать и 50-75 м.

Повреждения в воздушном оптическом кабеле, подвешенном на деревянных или металлических опорах, также возможны, в случае если металл присутствует в сердцевине или в оболочке кабеля.

Подвесные оптические кабели, в отличие от подземных, более открыты воздействию внешних полей, и в их металлических элементах возможно наведение ЭДС и токов, и как следствие, пробои изоляционных покрытий. Ток

молнии в оболочке может вызвать пробой между оболочкой и сердцевиной. Разрушение оптического волокна возможно, в случае если волокна находятся вблизи или на пути дуги или искрового пробоя.

Частота прямых ударов молнии в воздушный кабель зависит от плотности ударов молнии на кв. км в год в данной местности, высоты и длины линии.

Когда происходит удар молнии с большой амплитудой тока в воздушный кабель, оболочка которого не соединена с землёй, значительная часть тока молнии (J) образует дугу (перекрытие) от металлической оболочки по поверхности опоры или изолятора к земле.

В случае если металлическая оболочка воздушного оптического кабеля периодически заземлена, то возникновение повреждений зависит от расстояния между заземлёнными точками и величины сопротивлений заземлений (уровня грозоупорности линии). При малых расстояниях между заземлениями (порядка 100 м) и малой величине сопротивления заземления (менее 20 Ом) отражённая от заземления отрицательная волна гасит потенциал на оболочке кабеля.

В случае если расстояние между заземлениями велико (свыше 300м), и сопротивление заземления также большое (порядка 100 Ом), то отражённая от заземления волна не успевает погасить рост потенциала на оболочке, и происходит пробой в середине участка между заземлениями.

Оптические кабели, встроенные в грозозащитный трос высоковольтных линий электропередачи, обычно заранее защищены от возможных повреждений при грозе и температурного нагрева при коротких замыканиях высоковольтной линии с помощью надлежащим образом выбранной конструкции грозозащитного троса.

Вопросы расчёта вероятности повреждений и защиты оптических кабелей от ударов молнии рассматриваются в Рекомендации МСЭ-Т К-25. Вопросы защиты подземных оптических кабелей с металлическими элементами в конструкции регламентированы “Руководством по защите оптических кабелей от ударов молнии”.

Учитывая зависимость от конструкции кабеля и типа металлической оболочки и брони оптические кабели разбиты на четыре категории молниестойкости, которые определяются максимальным током, который кабель может выдержать при ударе в него молнии.

В Руководстве приводятся сведения о допустимом числе опасных ударов молнии (от 0.1 до 0.5 на 100 км трассы в год исходя из назначения кабеля и района прокладки) и уровне молниестойкости базовых конструкций отечественных оптических кабелей, а также таблицы вероятного числа повреждений оптических кабелей при различных условиях.

В случае если уровень молниестойкости не соответствует условиям прокладки, или вероятное число опасных ударов превышает допустимое, указанное Руководство рекомендует прокладку рядом с кабелем металлических грозозащитных проводов или тросов.

Аналогично рассматриваются вопросы воздействия токов коротких замыканий ЛЭП на металлические элементы оптических кабелей.

5.4.1.3 Воздействие молнии на полностью диэлектрический оптический кабель без металлических элементов в конструкции.

Распространённо заблуждение, что полностью диэлектрический кабель не подвержен воздействию электромагнитного поля молнии, однако это неверно. Свет имеет электромагнитную природу и реагирует на внешнее электромагнитное поле. Под действием поперечного электрического или продольного магнитного полей в волокне происходит поворот плоскости поляризации распространяющейся волны.

Другое дело, что это воздействие не приводит к повреждению кабеля, а лишь несколько меняет поляризацию волны и создаёт дополнительную поляризационную модовую дисперсию (ПМД).

Некоторые элементы линии бывают чувствительными к ПМД, в связи с этим рассмотрим данный вопрос подробнее. Явления вращения плоскости поляризации света в поперечном электрическом (эффект Керра) и продольном магнитном (эффект Фарадея) полях были открыты ещё в XIX веке.

При прохождении света по волокну под воздействием внешнего электромагнитного поля происходит поворот плоскости колебаний (поляризации) световой волны. Различным образом поляризованные волны света при падении на плоскую поверхность имеют разные величины Френелевских коэффициентов.

Изменение плоскости поляризации света в оптическом волокне может также привести к так называемому двойному лучепреломлению и возникновению двух ортогональных составляющих волны, между которыми распределится первоначальная энергия сигнала.

Каждая из составляющих будет распространяться независимо друг от друга. Так как параметры волокна вдоль различных плоскостей, проходящих через ось, могут несколько отличаться, следствием может явиться увеличение дисперсии и затухания сигнала, аналогичные поляризационной модовой дисперсии при геометрических неоднородностях волокна.

Эффект Керра пропорционален квадрату напряжённости поперечного внешнего поля и уменьшается с увеличением температуры. Плоскость поляризации поворачивается на угол

$$\varphi = 2\pi \cdot K \geq \cdot E^2 \cdot 1, \qquad (5.1)$$

где K - постоянная Керра, $K = 0.402 \cdot 10^{-13}$ м/В^2 ;

E – величина поперечного внешнего поля;

l - длина пути, проходимого светом под воздействием поля.

Как видно, K имеет малую величину, и для возникновения заметного эффекта Керра электрическое поле должно быть достаточно велико. Большие величины поля возможны вблизи точки удара молнии. В случае если удар

молнии происходит вблизи трассы проложенного в земле диэлектрического (без металлических элементов в конструкции) оптического кабеля (ОК), то в волокнах последнего возможно возникновение эффекта Керра. В случае, когда ОК подвешен на опорах высоковольтной линии передачи, переменное поперечное по отношению к кабелю поле также имеет значительную величину, причём на большой длине, однако эффект значительно уменьшается наличием металлического несущего троса. Очень большую величину в земле и на поверхности электрическое поле может иметь при воздействии высотного ядерного взрыва.

В случае ,если удар молнии происходит на расстоянии “а “ от трассы ОК, который проложен на глубине h, то при однородном строении земли напряжённость электрического поля в произвольной точке вблизи кабеля равна:

$$E = \frac{I\rho}{\left[2\pi(a^2 + h^2 + x^2)\right]}, \qquad (5.2)$$

где I - амплитуда тока молнии;

ρ - удельное сопротивление земли.

Ось x направлена вдоль оси кабеля, причём точка x = 0 соответствует на оси кабеля точке, ближайшей к точке удара молнии на поверхности земли (рисунок 5.16). Ось z направлена вертикально вниз, а ось y перпендикулярно осям x и z (параллельно поверхности земли на глубине h).

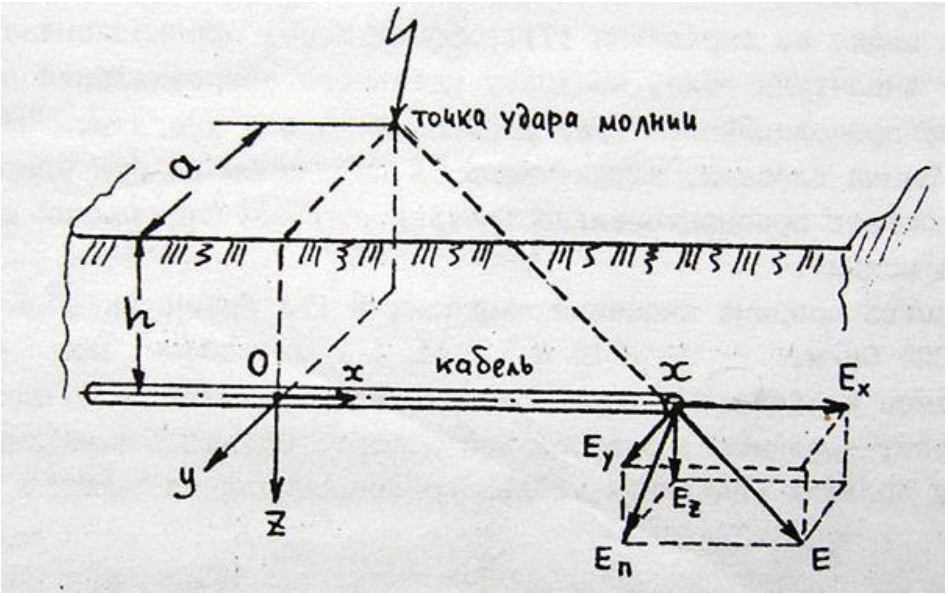


Рисунок 5.16 - Взаимное расположение точки удара молнии и кабеля

Поперечная кабелю составляющая поля $E_п$ в земле в точке x равна:

$$E_n = (E_y^2 + E_z^2)^{\frac{1}{2}} = \frac{E \cdot (a^2 + h^2)}{(a^2 + h^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{Eb}{(b^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{I\rho b}{\left[2\pi (b^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}\right]}, \qquad (5.3)$$

где $b = (a^2 + h^2)^{\frac{1}{2}}$.

Под действием поперечного электрического поля молнии плоскость поляризации поворачивается на угол:

$$\alpha = \frac{3}{16} K \frac{(I\rho)^2}{(a^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}. \qquad (5.4)$$

Как видно из выражения (5.4), эффект Керра пропорционален квадрату амплитуды тока, квадрату удельного сопротивления земли и обратно пропорционален кубу расстояния точки удара молнии от кабеля.

Полагая значения входящих в (5.4) величин: I = 50 кА, ρ = 1000 Омм, a =10 м, h =1 м, найдём, что φ = 1º.

То есть однократное воздействие молнии в одной точке при средних условиях вызывает сравнительно небольшой эффект. При этом в некоторых случаях при больших значениях удельного сопротивления грунта и амплитуды молнии и близком расстоянии до точки удара молнии (к примеру, a = 1 м) величина эффекта может возрасти в десятки раз.

Вместе с тем, как известно, удар молнии, как правило, состоит из нескольких повторных разрядов. В случае если длина кабеля велика, то удары молнии могут происходить в различных точках вдоль трассы кабеля, что ещё больше увеличит воздействие на волокно. Число случаев превышения углом поворота величины φ можно найти по формуле (5.5):

$$n_{\varphi 0} = 0.756 \cdot 10^{-2} \cdot \rho^{\frac{2}{3}} \cdot \varphi_0^{-\frac{1}{3}}, \qquad (5.5)$$

где ρ – удельное сопротивление грунта в Ом·м;

φ_0 - в радианах;

q = 0.1 удара/км^2·день, l = 100 км, число дней с грозой N = 25.

В таблице 5.1 приведены значения частоты появления (числа случаев за грозовой сезон) какой-либо величины φ_0 при различных значениях удельного сопротивления грунта и упомянутых значениях величин q, l и N.

При других значениях q, l и N таблице 5.1 легко должна быть переделана с помощью линейного пересчёта умножением табличных значений на коэффициенты q/0.1; l/100; N/25 соответственно.

Таблица 5.1 - Число случаев превышения величины φ_0 за грозовой сезон при q = 0.1; l = 100 км; N =25 и различных удельных сопротивлениях земли

ρ, Ом·м	φ_0 , град					
100	0.37	0.29	0.20	0.18	0.14	0.11
200	0.58	0.46	0.32	0.28	0.22	0.18
400	0.92	0.73	0.51	0.44	0.35	0.28
1000	1.7	1.35	0.94	0.82	0.65	0.52
2000	2.7	2.15	1.49	1.3	1.03	0.82
5000	4.97	3.96	2.74	2.4	1.9	1.51

Как видно из таблицы 5.1, поворот плоскости поляризации, к примеру на 45 градусов при удельном сопротивлении 100 Омм осуществляется примерно один раз в 5 лет, а при ρ = 400 Омм уже один раз в два года.

При ρ = 2000 Омм это случается чаще, чем раз в год, а при ρ = 5000 Омм два с половиной раза в год. Грунт с удельным сопротивлением от 50 до 500 Омм встречается обычно на равнинной местности; 800-2000 Омм характерны при наличии песка; 1000-5000 Омм – при наличии камней и скальных пород, а также в районах с многолетней мерзлотой.

5.4.1.4 Защита кабелей от ударов молнии. К основным мерам защиты подземных кабелей от повреждений, возникающих при попадании в них токов молнии, относятся:

1) Полный или частичный отвод токов канала молнии от кабеля. Это достигается путём прокладки одного или нескольких металлических проводов (тросов) в земле над кабелями или путём подвески на линейных опорах вдоль трассы кабеля воздушного провода с периодически оборудованными выносными заземлениями.

2) Повышение продольной проводимости металлических покровов кабеля или увеличение прочности поясной изоляции сердечника кабеля, или то или другое мероприятие одновременно. Применение кабелей с проводящим шлангом поверх металлической оболочки.

3) Подключение к жилам симметричного кабеля вдоль магистрали малогабаритных разрядников, устанавливаемых в кабельных муфтах. Этим мероприятием достигается снижение размеров повреждённой области линии.

4) Защита кабелей в шланге с помощью сосредоточенных заземлений, периодически подключаемых к металлической оболочке.

В присутствии тросов ток в оболочке кабеля равен:

$$I(t) = \eta I_0(t), \tag{5.6}$$

где η – коэффициент тока в кабеле, который показывает, какая часть тока молнии протекает по оболочке кабеля. Величина этого коэффициента зависит от материалов оболочки и тросов, взаимного расположения и

расстояний между ними. Обычно эта величина заключена в пределах от 0.3 до 0.7.

В качестве защитных проводов чаще всего применяются стальные провода типа ПС-70 или биметаллические провода диаметром от 4 до 6 мм, прокладываемые рядом с кабелем на половине глубины прокладки кабеля. Вблизи индустриальных центров возникают малоэтажные посёлки, населённые людьми с большими запросами, где требуется широкополосный доступ: интернет, передача данных, видео по запросу и т.д. Соединительной линией связи часто является воздушный или подземный оптический или электрический кабель малой ёмкости. По кабелям могут осуществляться системы FTTH (волокно к дому), кабельное телевидение и т.п.

Согласно Рекомендации МСЭ-т К.46 коэффициент воздействия грозовых разрядов на эти кабели отличен от нуля, в особенности у воздушных кабелей, и проблема их защиты от ударов молнии является актуальной. Для подземных кабелей она решается с помощью прокладки рядом с кабелем защитного металлического провода. При этом иногда трудно рассчитывать на прокладку защитных тросов рядом с уже проложенным кабелем. В этом случае достаточно эффективную защиту можно обеспечить с помощью сосредоточенных заземлений, подключённых к металлической оболочке или экрану кабеля.

В случае воздушного кабеля прокладка троса становится проблематичной. В случае если воздушный кабель имеет несущий металлический трос, то последний должна быть использован для грозозащиты, однако он должен периодически подключаться к заземлениям. При ударе молнии волна высокого потенциала достигает заземления и отражается с обратным знаком, уменьшая потенциал троса и кабеля. В случае если величина сопротивления заземления и расстояние до него невелики, то рост потенциала замедляется. В противном случае происходит перекрытие опоры дугой тока молнии.

Заключение

В данном учебнике изложены основные принципы организации двусторонних каналов и особенности передачи электрических сигналов по таким каналам. Также, изложены основы построения телекоммуникационных сетей различного назначения и принципы их взаимодействия. Даны базисы построения систем передачи с частотным и временным разделением каналов.

Большое место в учебнике отведено построению цифровых систем передачи с временным разделением каналов на основе импульсно-кодовой модуляции. Рассматриваются принципы иерархического построения систем передачи, поднимаются вопросы построения цифровых волоконно-оптических систем передачи.

Издание будет полезно для студентов, обучающихся по направлению «Телекоммуникационные сети и системы».

В учебнике рассматриваются современные технологии предоставления услуг, включая измерения параметров и оценивание качества обслуживания, в телекоммуникационных системах передачи данных, функционирующих на основе использования оборудования сетей с коммутацией пакетов.

Детально рассмотрены основные аспекты технологии предоставления услуг, связанные с передачей пакетных данных: виды систем предоставления услуг, параметры и классы обслуживания, методы и средства организационного и технического обеспечения предоставления услуг и т. п.

В первой части представлено изложение основ построения телекоммуникационных систем и сетей. Даны основные понятия и определения телекоммуникационных и информационных технологий. Рассмотрены понятия сигналов и сообщений.

Далее идет спектральное представление сигналов, основные параметры и характеристики каналов. Даны виды модуляции. В этом разделе рассмотрена многоканальная связь и методы разделения каналов в связи.

В третьей части изложены принципы построения многоканальных систем передачи, рассмотрены основы построения систем передачи с временным разделением каналов (ВРК), показана телекоммуникационная система с частотным разделением каналов. Представлены также методы мультиплексирования с разделением по времени, волновое мультиплексирование (WDM), метод случайного доступа CSMA/CD.

Далее дано преобразование аналоговой информации в цифровую форму.

В 4 части рассмотрена дискретизация сигналов, аналого-цифровое преобразование, цифро-аналоговое преобразование. Рассмотрены методы коммутации в каналах связи. Представлены разные подходы к выполнению коммутации связи, рассмотрена пропускная способность сетей с коммутацией пакетов и в сетях с коммутацией каналов и с коммутацией сообщений. Рассмотрены тенденции объединения цифровых потоков: объединение цифровых потоков в плезиохронной цифровой иерархии, а также объединение цифровых потоков в синхронной цифровой иерархии. Далее представлена

обобщенная структурная схема волоконно-оптической системы передачи, классификация ВОСП и особенности передачи электромагнитных колебаний по оптическому кабелю: грозовые разряды, их характеристики.

Информация рассчитана на специалистов, которые будут заниматься техническим и организационным обеспечениям предоставления телекоммуникационных услуг на основе использования ресурсов сетей передачи данных, полезна для студентов и магистрантов соответствующих специальностей.

Рассмотрены материалы относительно работы в устройствах объединения сетей: концентраторах, мостах, коммутаторах и маршрутизаторах.

Рассмотрены некоторые сетевые технологии, вопросы объединения сетей телекоммуникаций и вычислительных сетей. В книге рассматриваются современные технологии предоставления услуг, включая измерения параметров и оценивание качества обслуживания в телекоммуникационных системах, функционирующих на основе использования оборудования сетей с коммутацией пакетов. Детально рассмотрены основные аспекты технологии предоставления услуг, связанные с передачей пакетных данных: виды систем предоставления услуг, параметры и классы обслуживания, методы и средства организационного и технического обеспечения предоставления услуг и т. п.

Литература

1. Сети связи. Учебник для ВУЗов//Гольдштейн Б.С., Соколов Н.А., Яновский Г.Г.//СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 2011. – 400 с.

2. Б.С. Гольдштейн, Н.А. Соколов, Г.Г. Яновский. Сети электросвязи. – Санкт-Петербург, БХВ, 2010.

3. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. — СПб.: Питер, 2001. — 672 с.

4. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Основы сетей передачи данных. Курс лекций. М.: ИНТУИТ.РУ «Интернет-университет информационных технологий», 2003. – 248 с.

5. Дымарский Я.С. Задачи и методы оптимизации сетей связи. – Санкт-Петербург, издательство СПбГУТ, 2005.

6. http://nicksokolov.narod.ru

7. Домарев В.В. Безопасность информационных технологий. Системный подход — К.: ООО ТИД Диа Софт, 2004. — 992 с.

8. Романец Ю.В., Тимофеев П.А., Шаньгин В.Ф. Защита информации в компьютерных системах и сетях. 2-е изд. — М: Радио и связь, 2002. − 328 с.

9. Иванов М.А. Криптографические методы защиты информации в компьютерных системах и сетях. — М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2001. —368 с.

Оглавление

Предисловие.....3
Введение.....6
1 Принципы построения телекоммуникационных систем и сетей.....8
1.1 Основы построения телекоммуникационных систем и сетей Основные понятия и определения телекоммуникационных и информационных технологий. Сообщения и сигналы. 8
1.2 Структура ПС сети.....11
1.3 Классификация сетей по масштабно-территориальному признаку.....13
1.4 Классификация по принципу декомпозиции 14
1.5 Принцип передачи сообщений, информации, сигналов 16
2 Спектральное представление сигналов. Основные параметры и характеристики каналов. Виды модуляции. Многоканальная телефонная связь и методы разделения каналов в телефонной связи.....36
2.1 Спектральное представление сигналов.....36
2.2 Основные параметры и характеристики каналов 38
2.3 Виды модуляции.....45
2.4 Многоканальная телефонная связь и методы разделения каналов в телефонной связи 61
3 Многоканальные системы передачи 63

3.2 Основы построения систем передачи с временным разделением каналов (ВРК) 65
3.3 Телекоммуникационная система с частотным разделением каналов 69
3.4 Методы мультиплексирования и демультиплексирования сигналов 73
3.5 Преобразование аналоговой информации в цифровую форму 83
4 Дискретизация сигналов. Аналого - цифровое преобразование. 91
Цифро-аналоговое преобразование. Методы коммутации в каналах связи 91
4.1 Схема выборки и хранения. Определение интервала дискретизации . Схемы аналого-цифрового преобразования 92
4.2 Цифро-аналоговое преобразование 96
4.3 Методы коммутации в каналах связи 100
5 Тенденции объединения цифровых потоков 125
5.1 Плезиохронная цифровая иерархия 125
5.2 Структура и работа синхронного транспортного модуля 128
5.3 Обобщенная структурная схема волоконно-оптической системы передачи 136
5.4 Особенности передачи электромагнитных колебаний по оптическому кабелю 143
Заключение 153
литература 155

Хизирова Мухаббат Абдисаттаровна

Казиева Галия Сейткамзаевна

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Учебник
для студентов ОП
5В071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации

Бумага типографская №2

Уч.- изд.л. 5,0. Заказ № 155

Цена _тенге.

Копировально-множительное бюро
некоммерческого акционерного общества
«Алматинский университет энергетики и связи
имени Гумарбека Даукеева»
050013, Алматы, Байтурсынова, 126\1