

Глава 4

Принципы цифровой коммутации

Разумеется, мы никогда не поступимся нашими принципами.

В. Ленин, 27.11.1918

Принципами, товарищи, мы не должны поступаться ни под какими предложениями.

М. Горбачев, 18.02.1988

Не могу поступиться принципами.

Н. Андреева, 13.03.1988

4.1 Цифровая телефония

Как видно из материалов предыдущих глав, первые сто лет или около того эволюция ТФОП происходила довольно медленно. По сути, за исключением декадно-шаговых АТС и телефонов с дисковым номеронабирателем, за первые 50 лет было мало что сделано в плане технологии. Внедрение координатных АТС в 1930-х годах, автоматической междугородной связи в 1950-х и тастатурных телефонных аппаратов с тональным набором номера в 1960-х годах считались революционными событиями.

Темпы эволюции заметно возросли с появлением АТС с программным управлением, передачи цифровых данных по коммутируемым каналам с помощью модемов и факсов и общеканальной сигнализацией №7 в 1960-х, 1970-х и 1980-х годах, соответственно. К середине 1980-х годов темпы возросли значительно, а в начале 1990-х годов начало чувствоваться влияние сетей ISDN, концепции Интеллектуальной сети, идеи Информационной супермагистрали, а также других технологических и макроэкономических факторов, повлиявших на коммуникационные технологии. Одной из наиболее существ-

венных технологий среди перечисленных выше являются цифровые АТС с программным управлением.

В двух предыдущих главах были рассмотрены системы коммутации физических каналов, в которых каждому соединению предоставляется своя физическая линия (электрическая цепь). При цифровой коммутации носителем информации является не амплитуда передаваемого по линии электрического сигнала, а временная последовательность импульсов, т.е. временной канал, определяемый пространственной и временной координатами.

В данной главе рассматриваются основные принципы цифровой коммутации, на которых строятся изучаемые далее в книге цифровые АТС, концентраторы, мультиплексоры, шлюзы, конвертеры и другие устройства, обеспечивающие соединение и перенос информации в цифровом виде. К этому перечню следует добавить источники передачи информации, к которым наряду с рассмотренными ранее обычными телефонами относятся устройства передачи данных, терминалы ISDN, компьютеры, факсы, видеокамеры, сканеры и т.п. В качестве приемников информации, в дополнение к упомянутым, могут выступать, например, видеомониторы или принтеры.

Эпоху цифровой реализации телекоммуникационной сети предопределило наличие двух недорогих, но чрезвычайно важных устройств: кодеков, преобразующих аналоговые сигналы в цифровые (рис.4.1а), и модемов, преобразующих цифровые сигналы в аналоговые при передаче данных по аналоговым телефонным сетям (рис.4.1б). Именно они, наряду с цифровизацией многоканальной электросвязи – систем передачи с ИКМ, обусловили появление цифровых систем коммутации.

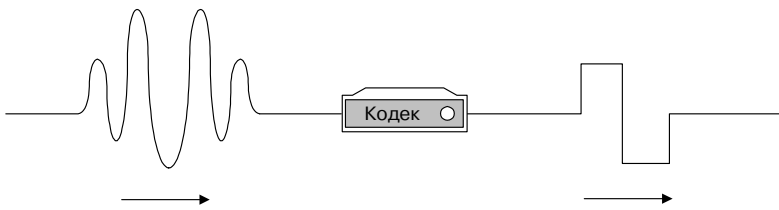


Рис. 4.1.а Аналого-цифровое преобразование - кодек

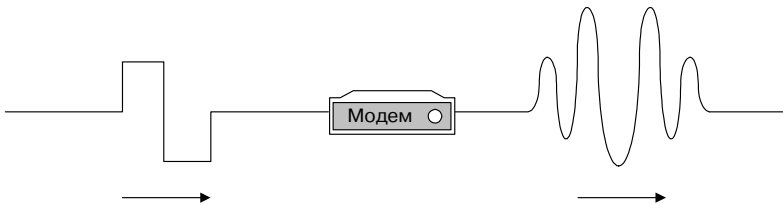


Рис. 4.1.б Цифро-аналоговое преобразование - модем

Суть цифровизации заключается в том, что исходный аналоговый электрический сигнал может быть воспроизведен из соответствующей последовательности дискретных значений его амплитуды (отсчетов). Число отсчетов в секунду называется *частотой дискретизации* и зависит от самого высокочастотного компонента, присутствующего в аналоговом сигнале. Известная *теорема Котельникова* гласит, что аналоговый сигнал можно правильно восстановить, если частота дискретизации вдвое превышает частоту сигнала. Именно на ней и на *теореме Найквиста*, доказанной Гарри Найквистом в 1928 году и устанавливающей тот факт, что, *если частота выборки f_s превышает не менее чем вдвое самую высокочастотную составляющую аналогового сигнала f_a , то первоначальный аналоговый сигнал полностью описывается только с помощью моментальных выборок* основывается *импульсно-кодовая модуляция (ИКМ)*. Эта минимальная частота выборки иногда называется *частотой Найквиста*.

Строже говоря, устройство дискретизации «вырезает» из первоначального аналогового сигнала $x(t)$ короткие выборочные импульсы (рис.4.2), образуя последовательность мгновенных значений амплитуды – *дискретизированный во времени сигнал $y(t)$* с частотой следования импульсов f_s . Этот процесс известен как *амплитудно-импульсная модуляция (АИМ)*.

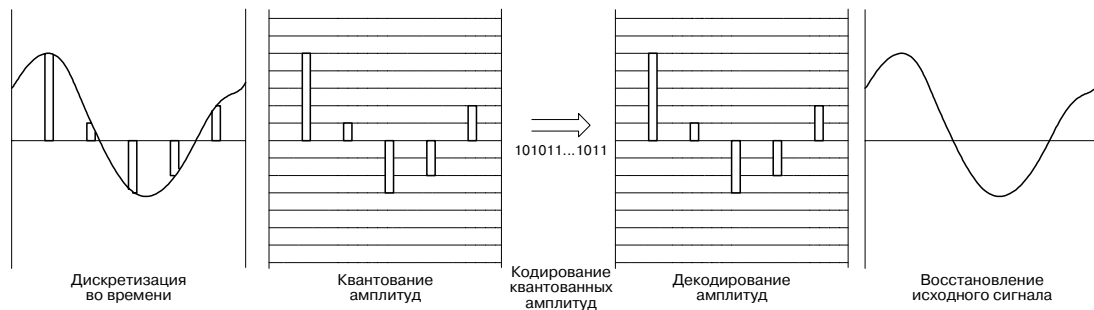


Рис. 4.2 ИКМ-кодирование аналогового сигнала речи и его восстановление

Полученный таким образом сигнал $y(t)$ представляет хотя и дискретные во времени, но, тем не менее, аналоговые значения амплитуды первоначального сигнала $x(t)$. Для того, чтобы передавать эти выборочные значения в цифровой форме, требуется их квантование: значение каждой амплитуды округляется до ближайшего числа из некоторого конечного набора заранее фиксированных чисел (уровней квантования), и в результате получается сигнал $z(t)$, *дискретизированный по амплитуде*. На рис.4.2 представлены исходный сигнал, дискретный во времени сигнал, полученный из исходного, и сигнал, полученный после квантования и представляющий собой

дискретную во времени последовательность дискретных амплитуд. Заметим, что при квантовании значения амплитуды исходного сигнала утрачиваются вследствие округления, так что этот сигнал уже не может быть восстановлен точно (потеря точности выражается в т.н. шумах квантования, рассмотрение которых остается за пределами учебника).

И, наконец, последнее преобразование сигнала, также показанное на рис. 4.2. Поскольку количество уровней квантования является конечным, все их можно пронумеровать (например, в порядке возрастания) и представить каждый номер в виде двоичного кодового слова. В результате сигнал $z(t)$ превращается в последовательность n -битовых слов, т.е. становится *цифровым*. Все это вместе и есть *импульсно-кодовая модуляция (ИКМ)*.

Очевидно, что чем больше уровней квантования, тем лучшую характеристику будет иметь восстановленный сигнал. Например, для речевых сигналов ИКМ достаточно иметь 256 уровней (8-битовые двоичные слова), но при кодировании музыки в CD-плеерах для получения удовлетворительной характеристики требуется 65536 уровней (16-битовые двоичные слова). Чем лучшее качество нам требуется, тем в большем количестве уровней квантования мы нуждаемся, и тем более длинными должны быть кодовые слова, что, естественно, приводит к необходимости передавать биты с более высокой скоростью. Скорость передачи битов должна быть настолько высока, чтобы цифровое слово, несущее предыдущее дискретное значение амплитуды сигнала, оказалось переданным до того, как появится следующее слово, готовое к передаче. Поэтому для каждой системы приходится искать определенный компромисс между качеством и скоростью передачи информации.

Аналоговый речевой сигнал в телефонии занимает диапазон частот шириной до 4000 Гц и требует производить отсчеты амплитуды 8000 раз в секунду, т.е. частота дискретизации составляет 8 кГц. При квантовании отсчетов используется 256 стандартных амплитуд, которые потом кодируются 8-разрядными двоичными словами. Затем эти слова передаются в соответствующих временных интервалах, а на приемной стороне выполняется обратный процесс приближенного восстановления исходного аналогового речевого сигнала. Частота отсчетов 8 кГц и 8-битовая схема кодирования (все это выбиралось в результате длительных дебатов в ITU-T) дают очень хорошее качество речи, правда, за счет довольно высоких требований к скорости передачи битов. Меньшая частота отсчетов и/или меньшая разрядность кодирования (7-битовая схема кодирования, например) дают менее гладкий и менее точно восстановленный речевой сигнал.

Итак, результат каждого отсчета представляется одним байтом. Имеем: 8000 байтов в секунду и 8 битов в каждом байте. Скорость потока данных, передающего человеческую речь, составляет:

$$\begin{array}{r} 4000\text{Гц} \\ \times 2 \\ \hline 8000 \text{ отсчетов в секунду} \\ \times 8 \text{ битов на отсчет} \\ \hline 64\text{Кбит/с} \end{array}$$

Поскольку ИКМ была первой стандартной технологией, получившей широкое применение в цифровых системах передачи, пропускная способность канала, равная 64 Кбит/с, стала всемирным стандартом для цифровых сетей всех видов. Все сегодняшние цифровые линии имеют пропускную способность, либо равную 64 Кбит/с, либо кратную этой величине. Например, пропускная способность цифрового тракта Е1 составляет 2.048 Мбит/с, что эквивалентно 32 каналам по 64 Кбит/с каждый (отметим сразу, что для передачи информации пользователей обычно используются 30 каналов, а остальные два служат для синхронизации, контроля и сигнализации).

Технология ИКМ, базирующаяся на математических результатах Найквиста и Котельникова, представляет собой сегодня наиболее общий метод преобразования аналоговых речевых сигналов в цифровую форму.

Однако не забудем, что и ИКМ, и канал 64 Кбит/с стандартизировались в 1970-е годы. Современные технологии цифровой обработки сигналов предоставляют много более действенных способов кодирования. Имеется в виду, что можно добиться лучшего качества при той же скорости передачи битов, или равноценного качества при более низкой скорости передачи. Сегодня существуют и используются более сложные схемы кодирования. Например, телефоны ISDN могут передавать высококачественную речь в диапазоне 7 кГц с той же скоростью 64 Кбит/с. Другой пример – это широко распространенная техника GSM.

В ряде ведомственных сетей уже давно применяют более эффективные системы кодирования, такие как АДИКМ. Поясним, что АДИКМ поддерживает передачу речи с «телефонным» качеством на скорости 32 Кбит/с, обеспечивая тем самым более эффективное использование имеющейся полосы пропускания. *Дифференциальная импульсно-кодовая модуляция (ДИКМ)* эффективнее, чем ИКМ, поскольку она предусматривает кодирование только изменений уровня сигнала. Основываясь на предположении, что изменение амплитуды речевого сигнала происходит относительно медленно, для представления каждого отсчета можно использовать меньше битов. В ДИКМ обычно используют 4 бита, что дает *коэффициент сжатия 2:1*. Такой уровень компрессии позволяет иметь в тракте Е1 64 канала по 32 Кбит/с вместо 32 каналов по 64 Кбит/с в стандарте ИКМ. ДИКМ обычно обеспечивает качество речи, сравнимое с ИКМ.

Адаптивная дифференциальная импульсно-кодовая модуляция (АДИКМ) улучшает качество ДИКМ, причем без увеличения количества необходимых битов, а благодаря увеличению диапазона изменений сигнала, которые можно представить 4-битовой величиной. Но поскольку АДИКМ не согласуется с АТС на базе ИКМ, то, чтобы ввести два сжатых до 32 Кбит/с разговора в один канал ИКМ, необходимо специальное оборудование – *мультиплексор компрессии битов*. Впрочем, к вопросу о 32 Кбит/с мы еще вернемся в главе 6 при описании отечественной станции С-32.

Отметим, что АДИКМ – не единственная технология, появившаяся в результате непрекращающихся экспериментов производителей средств телефонии с теоремой Котельникова. Одно из предложенных ими направлений – уменьшить точность, с которой уровни квантования соответствуют амплитудам исходного сигнала в точках отсчета, в результате чего для кодирования вместо восьми требуется всего шесть или семь битов. Другое направление хорошо иллюстрирует дощатый забор, верх которого обрезан по кривой линии: даже убрав четыре из каждых пяти досок, изгиб восстановить все-таки можно. Еще одно направление основано на предположении, что в обычной человеческой речи существуют прогнозируемые паузы: в эти паузы с помощью техники, известной как *подавление молчания*, вводятся дополнительные разговорные сигналы. Применяются также разные варианты метода квантования, которые пока не являются общепринятыми или широко используемыми в коммутационных узлах и станциях, но о которых будет сказано в главе 7, посвященной сетям доступа. В числе этих вариантов: *варьируемый уровень квантования (VQL)* – коэффициент компрессии 2:1 (32 Кбит/с), *непрерывно варьируемое изменение крутизны (CVSD)* – коэффициент компрессии 4:1 (16 Кбит/с) или 6,667:1 (9,6 Кбит/с), *кодирование с векторным квантованием (VQC)*, – коэффициент компрессии 4:1 (16 Кбит/с), *речь с высокой пропускной способностью (HCV)* – коэффициент компрессии 8:1 (8 Кбит/с). При применении таких методов компрессии нельзя забывать об одном жестком правиле: высвобождение ресурса пропускной способности, достигаемое с их помощью, оплачивается качеством звука. Новейшие методы могут обеспечить даже коэффициент сжатия 16:1 (скорость 4 Кбит/с), однако качество речи при этом становится приемлемым только для исключительных случаев. Эти вопросы будут также затронуты в главе 7.

4.2 Цифровые АТС

Теперь, вооружившись знаниями о технологии цифровой передачи информации, продолжим рассмотрение АТС, начатое в предыдущих главах книги. Коммутационная станция называется *цифровой*,

когда ее коммутационное поле может коммутировать только цифровые сигналы, несущие как речь, так и управляющие сообщения или команды. Аналоговые сигналы тоже могут коммутироваться цифровой станцией, но лишь с применением аналого-цифровых (A/D) и цифро-аналоговых (D/A) конвертеров. Сказанное представляет собой весьма упрощенное определение цифровой коммутации, но в следующих главах книги мы создадим из него более аккуратно и тщательно разработанную модель.

Эволюцию от аналоговой коммутации к цифровой иллюстрирует рис. 4.3. На рис. 4.3 а показаны аналоговые АТС с аналоговыми абонентскими и соединительными линиями (кстати, такое разделение на абонентскую и сетевую стороны узла коммутации прослеживается по всей книге). На рис. 4.3 б показана следующая фаза эволюции коммутации. В этой фазе цифровые коммутаторы взаимодействуют с другими цифровыми коммутаторами через цифровые соединительные линии, хотя могут также использоваться аналоговые абонентские линии и аналоговые соединительные линии, но непременно с использованием аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей. Однако коммутационное поле является цифровым, что подразумевает коммутацию в станции исключительно цифровых сигналов.

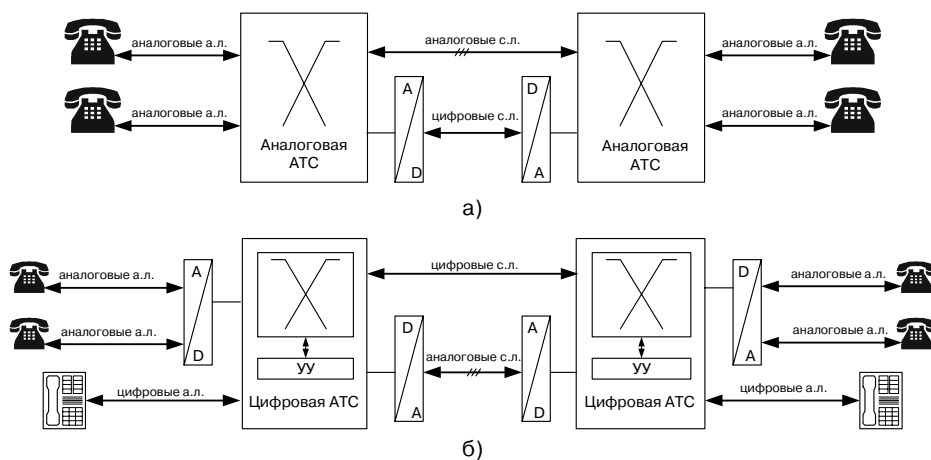


Рис. 4.3 Эволюция АТС

Ниже в этой главе будет использоваться поэтапный подход к изучению цифровой коммутации. Поскольку целью следующих глав является систематический анализ разных аспектов цифровых АТС, то здесь, во-первых, рассматривается базовая модель такой АТС, как она упрощенно представлена на рис.4.3 б, а затем эта модель будет постепенно расширяться, охватывая большинство важных функций современной цифровой коммутационной станции. В параграфе 4.3

рассматриваются комплекты аналоговых и цифровых абонентских линий, а затем, в параграфе 4.4, – базовое ядро цифровой станции с переключающей матрицей, которая называется *коммутационным полем*. Коммутационное поле переключает каналы и тракты под управлением процессора и соответствующих контроллеров. Далее вводятся понятия линейных и служебных модулей, контроллеров интерфейсов и распределенного программного управления, которое рассматривается затем в соответствующей главе вместе с программным обеспечением цифровой АТС. Таким образом, данная глава предназначена исключительно для изложения некоторых базовых принципов организации и работы цифровых станций.

В представленной на рис.4.3 б упрощенной блок-схеме гипотетической цифровой АТС можно выделить следующие функциональные подсистемы:

- Модули абонентских линий
- Коммутационное поле
- Модули соединительных линий
- Система управления.

В этот перечень не попало оборудование кросса (MDF, main distributing frame) – место, куда заводятся все входящие в станцию абонентские линии. Кросс имеет две стороны: вертикальную и горизонтальную. К вертикальной стороне подсоединяются абонентские кабели, а линии от абонентских модулей соединяются с горизонтальной стороной. Фактически соединение между вертикальной стороной (кабельная пара) и горизонтальной стороной (пара от станции) определяет номер абонента. Другим такого же рода устройством является распределительный магистральный щит (TDF, trunk distributing frame) – место подключения к АТС всех соединительных линий. TDF обычно меньше, чем кросс (MDF), и также имеет две стороны: вертикальную и горизонтальную. В состав оборудования АТС, как правило, входит электропитающая установка, представляющая собой совокупность силовых конвертеров, аккумуляторных батарей и аварийных источников питания станционного оборудования.

4.3 Абонентские модули

Прежде всего рассмотрим подробнее важнейший компонент любой цифровой АТС – комплекты аналоговых абонентских линий. Упрощенная схема абонентского комплекта показана на рис.4.4. и включает в себя элементы, поддерживающие батарейное питание (*Battery feed*), защиту от перенапряжения (*Overvoltage protection*), посылку вызова (*Ringling current*), контроль шлейфа абонентской линии (*Supervision*), кодирование аналоговых сигналов (*Cod-*