

1 Введение в теорию сетей связи и систем коммутации

1.1. История развития систем коммутации в сетях связи

За более чем столетний период своего развития техника телефонной связи прошла длинный путь от примитивных телефонных аппаратов и ручных коммутаторов до современных электронных автоматических телефонных станций, управляемых специализированными ЭВМ. В 1876 г. инженер А. Г. Белл (США) получил патент на изобретенное им телефонное устройство, благодаря которому стала возможной передача речи на расстояние с помощью электрических сигналов [2].

В этот день в американское патентное ведомство поступило две заявки на аппарат для передачи звуков на расстояние посредством электрического тока. Первая принадлежала американскому преподавателю школы глухонемых А. Г. Беллу. Вторая, поступившая на два часа позже, — американскому физику И. Грею. Обе заявки были вовсе не подобные, а принципиально различны. Белл сконструировал электромагнитный передатчик (микрофон), в котором передаваемый в линию ток изменялся вследствие изменения магнитного потока. Грей же предлагал совершенно иной метод изменения тока — вследствие изменения при колебаниях мембраны электрического сопротивления столбика проводящей жидкости. Не останавливаясь на сопоставлении достоинств и недостатков обоих устройств, отметим главное. Белл патентовал почти готовое устройство. Грей же подал лишь предварительное уведомление о намерении изобрести устройство с указанием предлагаемого принципа его действия.

Русские инженеры и техники в этот начальный период развития телефонной техники внесли существенный вклад в дело улучшения конструкции телефонных аппаратов и повышения дальности действия телефонной связи. П. М. Глубицкий разработал и получил патент на усовершенствованный микрофон с

угольным порошком и многополюсный телефон (1883 г.), а также способ питания микрофонов телефонных аппаратов от центральной батареи (1885 г.). Г. Г. Игнатьеву принадлежит идея использования в телефонном аппарате конденсатора для разделения цепей постоянного и переменного тока.

После изобретения телефона появились предложения по организации телефонной связи между абонентами с помощью простейших коммутаторов со штепселями, соединения на которых осуществлялись вручную оператором (телефонисткой). В 1878 г. была открыта первая в мире телефонная станция общего пользования в г. Нью-Хейвен (США).

Первые телефонные станции частного пользования в России были построены в 1880 г. на нескольких заводах Уфимской губернии. В 1882 г. появились первые телефонные станции в Петербурге, Москве, Одессе, Риге, а к 1900 г. были установлены телефонные станции в 95 городах России.

Уже в первые годы существования телефонной связи возникла идея автоматизации процесса соединения абонентских аппаратов между собой. В 1887 г. русский инженер К. А. Мосцицкий разработал АТС небольшой емкости — одну из первых АТС в мире, а в 1893 г. М. Ф. Фрейденберг разработал АТС с шаговыми искателями, макет которой был изготовлен в мастерских Одесского университета. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг патентует идею применения предыскателя, а в 1896 г. создает машинный искатель. В этом же году им были впервые введены в схему АТС предыскатель и групповой искатель.

В 1889 г. братья Струоджер получили патент на изобретенный ими декадно-шаговый искатель с подъемно-вращательным движением щеток. В 1892 г. в городе Ла-Порт (США) состоялся пуск первой АТС на искателях Струоджера.

Коммутационная техника в это время быстро развивалась, причем техника ручной коммутации достигла большого совершенства. Примером этого может служить Центральная московская телефонная станция, емкость которой в 1916 г. составляла 60 тыс. номеров. Однако основные усилия инженерной мысли в это время были направлены на создание более эффективных средств автоматической коммутации. Быстрое развитие техники АТС началось после изобретения декадно-шаговых искателей. С ростом телефонных сетей, особенно в крупных городах, стали сказываться недостатки, присущие декадно-шаговым системам АТС: недостаточная надежность, большие эксплуатацион-

ные расходы, малая емкость контактного поля искателей, большие затраты на построение телефонных сетей.

В 1910–1920 гг. появился ряд новых систем АТС с искателями большой емкости на 300–500 линий. Для приведения в движение искателей большой емкости применялся машинный привод, вследствие чего эти системы АТС получили название машинных. Машинные системы АТС получили широкое развитие в ряде стран в 1920–1930 гг.: «панельная» система в США, система «Ротари» во Франции, Бельгии, система «Эрикссон» в Швеции, СССР и в некоторых других странах.

Сложности производства приборов машинных АТС: малые возможности автоматизации их производства, а также значительные затраты труда на эксплуатацию привели к необходимости разработки новых систем АТС, свободных от этих недостатков. Такими системами стали координатные, в которых для коммутации разговорного тракта использовались электромеханические приборы, называемые многократными координатными соединителями (МКС), а для целей управления применялись общие релейные устройства, обслуживающие группу приборов. Эти системы АТС отвечали требованиям построения крупных телефонных сетей, обеспечивали существенное сокращение эксплуатационных расходов на обслуживание станций за счет более высокой надежности действия оборудования.

В 1950-е гг. появились станции механоэлектронного типа, в которых коммутация разговорного тракта осуществлялась электромеханическими приборами, такими, как координатные или кодовые соединители, а управляющие устройства в основном выполнялись на электронных элементах. Однако в этих системах главное преимущество электронных элементов (их быстродействие) полностью не использовалось из-за невысокой скорости работы приборов разговорного тракта. Также в 1950-е гг. были предприняты многочисленные попытки создания полностью электронных АТС, однако эти попытки не увенчались успехом ввиду больших трудностей создания экономичного электронного контакта для коммутации каналов, по которым передаются аналоговые сигналы. В 1960-е гг. были созданы квазиэлектронные системы АТС, в которых коммутация разговорного тракта осуществлялась быстродействующими электромеханическими приборами, герконовыми реле, ферридами, реле типа ESK, а устройства управления выполнены на электронных приборах.

В 1970-е гг. появилась возможность использования быстродействующих электронных приборов в системах с временным разделением каналов, в которых аналоговые сигналы передавались в виде дискретных значений. Это позволяло в промежутках между импульсами одного сообщения передавать импульсы другого сообщения. Преобразование аналоговых сигналов (речевых) в дискретные могло осуществляться на оконечной станции, в которую включена абонентская линия, или в аппарате абонента. Такая система временного уплотнения использовалась не только на линейных участках соединительного тракта, но и на внутрисканционных участках. Системы коммутации, в которых аппаратура коммутации и уплотнения выполнена на единых принципах и на единой элементной базе, а все виды информации передаются по сети связи в единой цифровой форме, называются *интегральными*.

В 1970-х гг. началась разработка интегральных сетей связи, где широкое применение нашли системы передачи с импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ) и электронные узлы коммутации. Для управляющих устройств в новых системах коммутации использовались электронные специализированные управляющие машины.

Переход на цифровую передачу и коммутацию немедленно привел к резкому улучшению качества передачи речи, особенно в тех случаях, когда участники соединения были разделены большим расстоянием. Для предотвращения потерь передаваемой информации требовалось множество регенераторов, кумулятивный побочный эффект которых вызывал значительное искажение сигнала, но цифровой сигнал, в отличие от аналогового, легко восстанавливать.

В истории развития сетей связи и систем коммутации можно выделить несколько этапов.

Первый этап характеризуется появлением декадно-шаговых систем АТС, относящихся к «первому поколению» автоматических систем телефонной коммутации. Первые АТС этой системы появились еще в конце девятнадцатого столетия. Автоматические телефонные станции в России начали производить в 1927 г. на заводе «Красная Заря» в Ленинграде. Это были станции «машинной» системы, которую также относят к АТС первого поколения.

Первая отечественная декадно-шаговая АТС, разработанная в 1947 г., получила название АТС-47. В 1954 г. была разработана

АТС усовершенствованной декадно-шаговой системы, получившая название АТС-54. Параллельно на заводе ВЭФ в Риге была разработана и начата производством декадно-шаговая АТС типа УАТС-49, предназначенная для автоматизации внутренней телефонной связи предприятий и учреждений.

Второй этап связан с появлением координатных АТС. Идея построения коммутационного прибора с релейными контактами, которые замыкаются с помощью координатных реек, была предложена в 1914 г. Рейнольдсом (США). Позднее такое устройство, усовершенствованное Бетуландером и Пальгредом, применили в Швеции, где в 1926 г. была пущена первая городская координатная АТС.

В начале 1940-х годов известная шведская фирма «Эрикссон» приступила к разработке и производству различных систем координатных АТС для городской, междугородной и сельской связи (ARF-50, ARM-20 и др.). В 1950-х годах системы координатных АТС были созданы во Франции (Пентаконта) и в Англии (5005). В 1960-х годах были разработаны городские координатные АТС в Чехословакии (РК-20) и ГДР (АТС-65).

В 1956 году в России было организовано производство городских координатных подстанций на сто номеров (ПС-МКС-100), а в последующие годы были разработаны сельские координатные АТС малой и средней емкости (К-40/80, К-100/2000 и К-50/200). Модификация АТС типа К-100/2000 выпускалась также для учрежденческой связи. В середине 1960-х годов завершилось создание координатной системы типа АТСК для городских телефонных сетей. Для автоматизации междугородной телефонной связи начали выпускаться координатные АМТС большой и средней емкости (АМТС-2 и АМТС-3).

Третий этап характеризуется появлением квазиэлектронных и электронных АТС. По мере развития технологий стали появляться заменители традиционных электромеханических коммутационных элементов — электронные и магнитные устройства, в которых отсутствовали подвижные части, а следовательно, практически исчезали механические повреждения, повышалось быстродействие, снижались габариты и масса.

Преимуществами электронных коммутационных элементов были также более высокая технологичность изготовления, большая интеграция компонентов в одном корпусе, возможность использования печатного монтажа и других достижений электроники того времени: транзисторов, полупроводниковых диодов,

магнитных элементов с прямоугольной петлей гистерезиса, твердых интегральных схем и больших интегральных схем (ВИС) с высокой степенью интеграции. Соответственно, электронные АТС, по сравнению с электромеханическими, имели меньшие габариты, требовали меньших площадей и кубатуры зданий, меньших затрат на электроэнергию и эксплуатационное обслуживание, обеспечивали более гибкие возможности построения телефонных сетей.

Интерес к квазиэлектронным АТС (КЭАТС) возник благодаря быстроедействию элементов, коммутирующих разговорный тракт, а также возможностями более эффективно использовать электронные устройства управления. Разрабатываемые квазиэлектронные АТС отличались между собой большим разнообразием основных технических решений.

В квазиэлектронных АТС в качестве управляющих устройств в коммутационных узлах различного назначения (АТС, АМТС, УИС, УВС, УАТС и т. д.) находили применение специализированные электронные управляющие машины (ЭУМ). Эти машины, кроме основных функций по установлению соединений, контролировали состояние оборудования, учитывали телефонную нагрузку и потери сообщения на отдельных направлениях, определяли номер вызывающего абонента при автоматической междугородной связи, производили тарификацию междугородных переговоров и т. д.

В КЭАТС была предусмотрена возможность предоставления абонентам по мере необходимости дополнительных видов обслуживания, таких, как сокращенный набор номера для наиболее часто вызываемых абонентов, автоматическая переадресация вызова на другой телефонный аппарат, установка на ожидание в случае занятости вызываемого абонента, конференц-связь, наведение справок без нарушения установленного соединения и т. д.

Одновременно с разработкой КЭАТС проводились исследования по созданию полностью электронных АТС (ЭАТС) с использованием различных методов модуляции и уплотнения линий связи (частотной, фазоимпульсной, амплитудно-импульсной и т. д.), из которых наиболее эффективна и экономична импульсно-кодовая модуляция, использовавшаяся в сочетании с временным делением каналов (ВДК). Опытная эксплуатация первой ЭАТС в России началась еще в 1955 г., а коммерческая — в 1963 г.

Система ИКМ с ВДК называется также синхронным мультиплексированием и является одним из основных компонентов,

используемых при построении современных ЭАТС и цифровых систем электросвязи.

В 1970-х гг. начинается четвертый этап развития современных систем и средств электросвязи, характеризующийся внедрением ЭАТС и цифровых каналов связи на сетях связи.

В г. Ланьоне (Франция) на сети общего пользования была установлена в 1970 г., разработанная фирмой «Алкатель» (Alcatel) цифровая ЭАТС Е10. В 1973 г. был впервые введен в эксплуатацию 24-километровый волоконно-оптический кабель в Германии.

Появление программно-управляемых ЭАТС, использование в коммутационном поле системы ИКМ с ВДК, а также возникновение и развитие цифровых каналов явились предпосылками для создания интегральных цифровых систем связи (ИЦСС) — Integrated Digital Network (IDN). ИЦСС представляло собой полностью цифровую систему, в которой осуществлялась интеграция коммутационного и каналобразующего оборудования на базе ИКМ с ВДК.

Разработка нового метода коммутации — коммутации пакетов и создание сетей ЭВМ с пакетной коммутацией вызвали появление гибридных сетей, в которых интегрировались два метода коммутации — коммутации каналов (КК) и пакетов (КП). Гибридные сети и ИЦСС обеспечивали базовые предпосылки для перехода в начале 80-х гг. к пятому этапу развития современных сетей связи и систем коммутации — появлению цифровых сетей интегрального обслуживания (ЦСИО) — Integrated Services Digital Network (ISDN).

В ЦСИО на основе единых принципов построения и функционирования с использованием ограниченного числа многофункциональных интерфейсов «пользователь-сеть» интегрируется не только коммутационное и передающее оборудование, как в ИЦСС, но и различные виды передаваемой информации (речь, данные и т. д.), методы КК и КП, различные виды обслуживания (сокращенный номер, обратный вызов, переадресация вызова и т. д.).

Предоставление абоненту возможности передачи той или иной информации (речь, данные и др.), выбора метода коммутации (КК или КП) и того или иного вида обслуживания его заявки (услуги) при установлении связи принято называть *сервисом электросвязи*. При передаче разнообразной информации через многофункциональный интерфейс «пользователь-сеть» с одного

и того же абонентского пункта, по одной и той же абонентской линии (АЛ) с применением методов КК или КП с использованием различных видов обслуживания заявок пользователя используют термин *интегральный сервис* или *интегральное обслуживание абонента сети*.

Одной из особенностей ЦСИО являлось использование пакетной системы сигнализации № 7 как при КК, так и при КП, разработанной ранее для телефонной сети (1976 г.).

В 1984 г. Международным консультативным комитетом по телеграфии и телефонии (ITU-T) — International Telegraph and Telephone Consultative Committee (ССТТТ, в настоящее время ITU-T — сектор стандартизации МСЭ) были выпущены первые рекомендации новой серии I по ЦСИО. После внедрения в ряде европейских стран национальных ЦСИО с 1989 г. начала создаваться ЦСИО Европы (Евро-ЦСИО) с участием 17 европейских стран и Японии, которая присоединилась к этому проекту в 1993 г. Евро-ЦСИО функционирует с 1993 г.

Пятый этап развития сетей электросвязи также характеризуется активной интеллектуализацией сетей. Большой вклад в это направление был сделан введением в сеть АТ&Т (США) Сервиса 800. Однако реальное введение на сети интеллектуальной обработки вызовов началось с конца 1980-х гг., когда была сформулирована концепция технологии обработки вызовов, требующих дополнительных услуг, с применением элементов искусственного интеллекта. Такие сети получили название интеллектуальных сетей (ИС) — Intelligent Network (IN).

В 1990-е гг. началось развитие и широкое применение ЦСИО с использованием интеллектуальной технологии. Интеллектуальные сети на основе ЦСИО займут лидирующее место в телекоммуникационных системах при создании, в частности, различного рода частных и корпоративных сетей.

Перспективы дальнейшего развития сетей связи и систем коммутации, в том числе создание на базе ЦСИО системы мультимедиа, предполагают разработку нового вида абонентского оборудования, сочетающего в себе все вышеизложенные и новые, перспективные возможности. Процесс конвергенции характеризуется все большим взаимопроникновением сетей трех основных типов: телефонных сетей общего пользования (ТфОП), сетей подвижной связи (СПС) и пакетных IP-сетей, которые таким образом сходятся к единой мультисервисной сети.

1.2. Основные понятия теории сетей связи и систем коммутации

Совокупность устройств и сооружений, обеспечивающих телефонную связь на некоторой территории, называют *телефонной сетью*. В состав такой сети входят коммутационные устройства (автоматические телефонные станции, узловые станции, подстанции, концентраторы и мультиплексоры), линейные сооружения (абонентские и соединительные линии, каналы междугородной и международной связи), гражданские сооружения (здания телефонных станций, усилительных пунктов), телефонные аппараты и пульта операторов. В процессе эволюции телефонная сеть стала составной частью мощной инфраструктуры цифровых телекоммуникаций, в которой речь — лишь один из типов передаваемых данных. Телефонная сеть может рассматриваться как сеть телекоммуникаций, поддерживающая телефонию, а телекоммуникационная сеть — как телефонная сеть, снабженная средствами поддержки обмена мультимедийной информацией [3].

Различают следующие виды ТфОП: городские, сельские, зонные и междугородные.

Городские телефонные сети (ГТС) обеспечивают телефонную связь на территории более или менее крупного города и его ближайших пригородов.

Простейшей ГТС является нерайонированная ГТС. На такой сети устанавливается одна телефонная станция, куда включаются абонентские линии. Нерайонированные ГТС используются в городах с небольшой емкостью и обслуживаемой территорией. При увеличении абонентской емкости и размеров обслуживаемой территории для уменьшения затрат на линейные сооружения целесообразно строить ГТС по принципу районирования. В этом случае территория города разбивается на районы. В каждом из районов размещается районная АТС (РАТС), в которую, как правило, включаются 10000 абонентов этого района. РАТС соединяются между собой по принципу «каждая с каждой».

Сельские телефонные сети (СТС) обеспечивают телефонную связь в пределах сельских административных районов. Сети этих двух видов объединяет общее название *местные телефонные сети*.

Основой СТС является центральная станция (ЦС), в которую включаются линии от вышестоящей АМТС, соединительные линии от оконечных станций (ОС), а при радиально-узловом

построении и от узловых станций (УС). Центральная станция устанавливается в районном центре и обычно имеет емкость до 1000–2000 номеров. Узловые станции концентрируют нагрузку от ОС и включаются в ЦС. Оконечная станция предназначена для подключения абонентов.

Зоновые телефонные сети — это комплекс сооружений, которые предназначены для связи между абонентами нескольких разных местных телефонных сетей, расположенных на территории одной *телефонной зоны*. В такой зоне используется единая семизначная *зональная нумерация*. Территории телефонных зон часто совпадают с территориями областей, краев и иных административных образований.

Междугородная телефонная сеть — это комплекс сооружений, предназначенных для организации связи между абонентами местных телефонных сетей, расположенных на территории разных телефонных зон. Междугородная телефонная сеть предназначена для установления соединений между АМТС различных зональных сетей и включает АМТС, узлы автоматической коммутации первого класса (УАК1) и второго класса (УАК2), пучки телефонных каналов, связывающие станции и узлы между собой. АМТС являются окончательными станциями междугородной сети. На УАК устанавливаются только транзитные соединения.

Телефонная сеть страны представляет собой совокупность местных телефонных сетей, объединяемых в масштабе области, части области или нескольких областей в зональные сети, которые, в свою очередь, объединяются в единую сеть с помощью междугородных линий и коммутационных узлов. Такая структура тесно связана с административным построением России, оказывающим огромное влияние на характер потоков информации между абонентами телефонной сети связи. Все названные сети вместе образуют телефонную сеть общего пользования, входящую во Взаимосвязанную сеть связи России.

Помимо ТфОП существуют также *учрежденческие, ведомственные*, корпоративные телефонные сети, которые обеспечивают внутреннюю телефонную связь предприятий, учреждений, корпораций, организаций. Такие сети могут быть и полностью автономными, но чаще всего они имеют доступ к ТфОП.

Коммутационный элемент (КЭ) — это устройство, которое при работе может переходить в любое из двух состояний. Сектор стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи (ITU-T), определил *коммутацию* как «соедине-

ние одного (определенного) из множества входов системы с одним (определенным) из множества ее выходов, организуемое по запросу и предоставляемое этой паре вход-выход на время, которое требуется для обмена информацией между ними», т. е. соединение создается в соответствии с номером линии вызываемого пользователя, набранным вызывающим пользователем, и сохраняется до тех пор, пока один из них не положит трубку. Пока это соединение существует, по нему могут передаваться речь, данные, видео и другие виды информации. По окончании связи соединение разрушается, после чего сетевые ресурсы, из которых оно было составлено, могут использоваться для создания других соединений.

Коммутация — это процесс последовательного соединения нескольких постоянно существующих независимо один от другого каналов в один составной канал, создаваемый только на время связи с тем, чтобы пользователи в конечных точках этого коммутируемого канала могли общаться между собой, т. е. обмениваться информацией. Компоненты коммутируемого канала выбираются из числа свободных, доступных и находящихся в нужном направлении.

Аналоговой коммутацией называется процесс, при котором соединение между конечными точками коммутируемого канала устанавливается посредством операций над аналоговым сигналом (с возможной его дискретизацией, но без преобразования в цифровую форму).

Цифровой коммутацией называется процесс, при котором соединение между конечными точками коммутируемого канала устанавливается с помощью операций над цифровым сигналом без преобразования его в аналоговый сигнал.