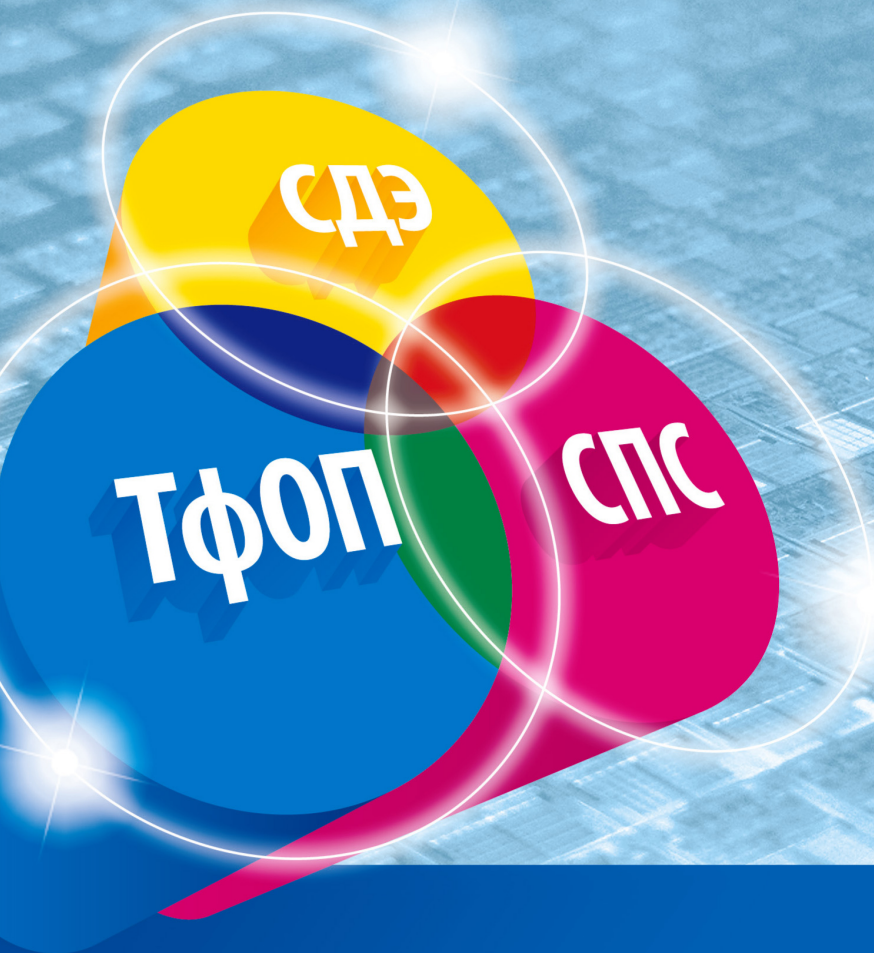


Б.С. ГОЛЬДШТЕЙН
Н.А. СОКОЛОВ
Г.Г. ЯНОВСКИЙ



СЕТИ СВЯЗИ

Учебник для ВУЗов

Б. С. Гольдштейн, Н. А. Соколов, Г. Г. Яновский

СЕТИ СВЯЗИ

*Учебник для студентов, обучающихся по специальности
210406 – «Сети связи и системы коммутации» и по другим
междисциплинарным специальностям телекоммуникационного
направления базового высшего образования*

Санкт-Петербург

«БХВ-Петербург»

2014

ГРНТИ 49.33.29
УДК 621.394/.395/.39688 (0-75)
ББК 32.883
О-75

О-75 Б.С. Гольдштейн, Н.А. Соколов, Г.Г. Яновский. Сети связи:
Учебник для ВУЗов. СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 401 с.,
илл.

ISBN 978-5-9775-2798-9

Книга является учебником по современным сетям связи. Она будет полезна студентам, бакалаврам и магистрам, а также аспирантам, исследования которых прямо или косвенно затрагивают разные аспекты построения, эксплуатации и развития телекоммуникационных сетей. Инженеры и менеджеры, работающие в области электросвязи, тоже найдут для себя полезные сведения. Процессу усвоения пройденного материала, несомненно, будут способствовать помещенные после каждой лекции ключевые слова, контрольные вопросы, задачи и упражнения, дополнительная литература.

В учебнике рассматриваются три сети, создававшиеся для поддержки следующих видов обслуживания: фиксированная телефонная связь, мобильные коммуникации и документальная электросвязь. Для каждой из трех сетей изложены идентичные по своему характеру базовые принципы построения и функционирования. Сформулирована основная цель дальнейшего развития трех рассматриваемых сетей – переход к сети связи следующего поколения, известной по аббревиатуре NGN (Next Generation Network).

ББК 32.883

Учебное издание

Рецензенты:

Кафедра АЭС МТУСИ,
зав. кафедрой, кандидат технических наук, профессор А.П. Пшеничников
Кафедра АЭС СибГУТИ,
зав. кафедрой, доктор технических наук, профессор В.В. Лебедев

Регистрационный номер МГУП рецензии ГОУ «Московский технический университет связи и информатики» _____

ISBN 978-5-9775-2798-9

© Гольдштейн Б.С., Соколов Н.А., Яновский Г.Г., 2014

Издательство «БХВ-Петербург», 190005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., 29.

Содержание

Предисловие	13
Лекция 0. Вводная	15
0.1. Преамбула	15
0.2. Теорема Котельникова	18
0.3. Стандартизация в области электросвязи.....	19
0.4. Конвергенция сетей связи.....	20
0.5. Об этой книге	22
Часть 1. Телефонная сеть общего пользования 25	
Лекция 1. Эволюция телефонных сетей.....	26
1.1. Базовые понятия	26
1.2. Краткий исторический экскурс	27
1.3. Основные термины.....	30
1.4. Единая сеть электросвязи Российской Федерации	36
1.5. Статистика телефонной сети.....	37
Ключевые слова	38
Контрольные вопросы	38
Задачи и упражнения	38
Литература к лекции 1	38
Лекция 2. Структура телефонной сети общего пользования	39
2.1. Уровни иерархии в ТфОП	39
2.2. Местные телефонные сети	41
2.2.1. Городские телефонные сети.....	41
2.2.2. Сельские телефонные сети	45
2.3. Зоновые телефонные сети	46
2.4. Междугородная и международная телефонные сети	48
Ключевые слова	52
Контрольные вопросы	52
Задачи и упражнения	52
Литература к лекции 2	52
Лекция 3. Сетевые технологии	53
3.1. История развития сетевых технологий в ТфОП	53
3.2. Технологии передачи информации	54
3.3. Синхронизация	56
3.4. Технологии коммутации каналов	57
3.5. Цифровизация городских телефонных сетей.....	58

3.6.	Цифровизация сельских телефонных сетей	65
	Ключевые слова	67
	Контрольные вопросы	67
	Задачи и упражнения	68
	Литература к лекции 3	68
Лекция 4. Системы сигнализации ТфОП		69
4.1.	Роль сигнализации в телефонной сети	69
4.2.	Эволюция систем сигнализации	70
4.3.	Общий канал сигнализации	75
4.4.	Сеть сигнализации	78
	Ключевые слова	80
	Контрольные вопросы	80
	Задачи и упражнения	80
	Литература к лекции 4	80
Лекция 5. Система и план нумерации		81
5.1.	Некоторые определения	81
5.2.	Действующий план нумерации ЕСЭ РФ	83
5.3.	Особенности нумерации в российской телефонной сети	87
5.4.	Перспективный план нумерации для ЕСЭ РФ	89
	Ключевые слова	91
	Контрольные вопросы	91
	Задачи и упражнения	92
	Литература к лекции 5	92
Лекция 6. Средства поддержки услуг		93
6.1.	Принципы интегрального обслуживания	93
6.2.	Концепция Интеллектуальной сети	97
6.3.	Средства компьютерной телефонии	99
	Ключевые слова	101
	Контрольные вопросы	101
	Задачи и упражнения	101
	Литература к лекции 6	101
Лекция 7. Услуги, поддерживаемые ТфОП		102
7.1.	Классификация услуг, предоставляемых ТфОП	102
7.2.	Дополнительные услуги в телефонии	105
7.3.	Особенности предоставления услуг в СТС	110
7.4.	Перспективы развития рынка услуг ТфОП	111
	Ключевые слова	112
	Контрольные вопросы	112
	Задачи и упражнения	112
	Литература к лекции 7	112

Лекция 8. Качество обслуживания в ТфОП	113
8.1. Основные понятия	113
8.2. Качество обслуживания вызовов	117
8.3. Качество телефонной связи	120
Ключевые слова	124
Контрольные вопросы	124
Задачи и упражнения	124
Литература к лекции 8	124
Лекция 9. Задачи анализа и проектирования ТфОП	125
9.1. Основные направления исследований в телефонии	125
9.2. Место установки коммутационной станции и ее емкость	128
9.3. Оценка необходимых транспортных ресурсов	130
9.4. Нормирование показателей качества обслуживания в ЧНН	132
Ключевые слова	135
Контрольные вопросы	136
Задачи и упражнения	136
Литература к лекции 9	136
Лекция 10. Перспективы развития ТфОП	137
10.1. Направления эволюции телефонии	137
10.2. Системные аспекты развития телефонной связи.....	139
10.3. Сетевые аспекты развития телефонной связи	140
10.4. Пример воздействия внешних факторов: переход к NGN	142
Ключевые слова	147
Контрольные вопросы	147
Задачи и упражнения	148
Литература к лекции 10	148
Часть 2. Сети подвижной связи.....	149
Лекция 11. Эволюция систем радиосвязи.....	150
11.1. Конвергенция сетей подвижной и фиксированной связи	150
11.2. Системы радиосвязи.....	151
11.2.1. Беспроводные телефонные системы.....	151
11.2.2. Пейджинговые системы	151
11.2.3. Транкинговые системы	151
11.2.4. Беспроводные компьютерные сети.....	152
11.2.5. Спутниковая связь	152
11.2.6. Системы сотовой связи	153
11.3. Краткий исторический экскурс	153
11.4. Основные понятия и термины.....	154
11.5. Способы доступа к СПС.....	158

11.6. Международные и национальные стандарты	159
11.6.1. Еще раз об ITU-T	159
11.6.2. Роль ETSI в мобильной связи	159
11.6.3. Проект партнерства 3-го поколения	160
11.6.4. Проект 2 партнерства 3-го поколения	161
11.6.5. Национальные стандарты	161
Ключевые слова	161
Контрольные вопросы	162
Задачи и упражнения	162
Литература к лекции 11	162

Лекция 12. Поколения сетей сотовой связи 163

12.1. Первое поколение 1G	163
12.2. NMT-450	165
12.3. Система AMPS	165
12.4. Система второго поколения D-AMPS	166
12.5. Стандарт CDMA	166
12.6. Системы 2,5G	168
12.7. Мобильная связь третьего поколения 3G	168
12.8. Мобильная связь четвертого поколения 4G	170
Ключевые слова	171
Контрольные вопросы	171
Задачи и упражнения	171
Литература к лекции 12	171

Лекция 13. Сетевая технология GSM 172

13.1. Введение в GSM	172
13.2. Структура сети GSM	175
13.3. SIM-карта	175
13.4. Подсистема базовой станции	176
13.5. Регистр HLR и центр аутентификации AuC	176
13.6. Гостевой регистр VLR	178
13.7. Центр коммутации MSC	179
13.8. Функция взаимодействия IWF	180
13.9. Регистр идентификации оборудования EIR	180
13.10. SMS-центр	181
Ключевые слова	182
Контрольные вопросы	182
Задачи и упражнения	182
Литература к лекции 13	182

Лекция 14. Системы сигнализации СПС.....	183
14.1. Мобильные приложения стека протоколов ОКС.....	183
14.2. Модель протокола MAP	184
14.3. Интерфейсы A, B, Abis	186
14.4. Обновление данных о местонахождении абонента с помощью MAP	188
14.5. Входящий вызов в СПС из ТФОП.....	191
14.6. Исходящий вызов из СПС в ТФОП	193
Ключевые слова	194
Контрольные вопросы	194
Задачи и упражнения	194
Литература к лекции 14	194
Лекция 15. Система нумерации СПС.....	195
15.1. Отличия нумерации для мобильной связи	195
15.2. Нумерация в GSM.....	196
15.2.1. Идентификатор IMSI	196
15.2.2. Идентификатор TMSI	198
15.2.3. Номер MSISDN.....	198
15.2.4. Номер MSRN.....	199
15.2.5. Идентификатор IMEI	199
15.3. План нумерации в сетях подвижной связи	200
15.4. Нумерация услуг СПС.....	202
15.5. Перспективы развития плана нумерации СПС	203
Ключевые слова	204
Контрольные вопросы	204
Задачи и упражнения	204
Литература к лекции 15	204
Лекция 16. Технологии и услуги сетей UMTS	205
16.1. Предпосылки перехода к 3G	205
16.2. Сети UMTS	207
16.3. Трафик в UMTS	208
16.4. Архитектура 3GPP релиз 99	209
16.5. Архитектура 3GPP релиз 4	211
16.6. Архитектура All-IP по 3GPP релиз 5	212
16.7. Развитие UMTS в Rel'6, Rel'7 и Rel'8	213
Ключевые слова	214
Контрольные вопросы	214
Задачи и упражнения	214
Литература к лекции 16	214

Лекция 17. Услуги, поддерживаемые СПС	215
17.1. Услуги сетей 3G	215
17.2. Услуги сетей 2.5G и технология EDGE.....	218
17.3. Пакетная сеть GPRS	219
17.4. Высокоскоростная передача данных HSCSD	221
17.5. Услуги WAP	222
17.6. Услуги SMS.....	222
17.7. Виртуальная домашняя среда VHE	223
17.8. CAMEL и протокол CAP	223
17.9. Услуга Push-to-talk.....	224
Ключевые слова	225
Контрольные вопросы	225
Задачи и упражнения	225
Литература к лекции 17	225
Лекция 18. Качество обслуживания в СПС.....	226
18.1. Основные понятия	226
18.2. Стандартизация качества обслуживания в СПС	227
18.3. Критерии качества обслуживания в СПС	229
18.4. Показатели качества обслуживания в СПС	229
18.5. Особенности СПС с точки зрения качества обслуживания	231
18.6. Инструментальные средства для оценки QoS.....	233
Ключевые слова	234
Контрольные вопросы	234
Задачи и упражнения	234
Литература к лекции 18	234
Лекция 19. Задачи расчета СПС	235
19.1. Особенности расчета сетей СПС	235
19.2. Повторное использование частот в СПС.....	236
19.3. Расчет емкости сети подвижной связи	239
19.4. Оценка пропускной способности транспортной сети в GPRS ..	240
Ключевые слова	243
Контрольные вопросы	243
Задачи и упражнения	244
Литература к лекции 19	244
Лекция 20. Перспективы развития СПС	245
20.1. Перспективы сетей подвижной связи	245
20.2. Эволюция технологий СПС	247
20.3. Технологии 4G	248
20.4. Концепция IMS	249
20.5. Архитектура IMS	251

20.6. Плоскость управления IMS	253
20.7. Плоскость приложений (услуг)	257
Ключевые слова	258
Контрольные вопросы	258
Задачи и упражнения	258
Литература к лекции 20	258

Часть 3. Сети документальной электросвязи .. 259

Лекция 21. Эволюция сетей передачи данных 260

21.1. Принципы коммутации пакетов	260
21.2. История создания компьютерных сетей	264
21.3. Модель взаимосвязи открытых систем	266
21.4. Стандартизация в сетях Интернет	269
Ключевые слова	270
Контрольные вопросы	270
Задачи и упражнения	270
Литература к лекции 21	270

Лекция 22. Сети на базе виртуальных соединений..... 271

22.1. Сети на базе протокола X.25.....	271
22.2. Сети на базе протокола Frame Relay	275
22.3. Сети ATM.....	277
22.3.1. Введение	277
22.3.2. Структура ячейки ATM.....	277
22.3.3. Эталонная модель протоколов ATM	279
22.3.4. Классы обслуживания на уровне AAL	280
22.3.5. Классы обслуживания в сети ATM и показатели качества обслуживания	281
Ключевые слова	283
Контрольные вопросы	283
Задачи и упражнения	284
Литература к лекции 22	284

Лекция 23. Сети на базе протоколов TCP/IP 285

23.1. Сети Интернет	285
23.2. Эталонная модель протоколов сети Интернет	286
23.3. Протоколы стека TCP/IP	287
23.4. Принципы организации сети Интернет	288
23.5. Структура заголовков IPv4 и IPv6	289
23.6. Структура заголовков TCP и UDP	294
Ключевые слова	297
Контрольные вопросы	297
Задачи и упражнения	207
Литература к лекции 23	297

Лекция 24. Системы сигнализации VoIP	298
24.1. Создание архитектуры SIP	298
24.2. Протокол SDP	299
24.3. Управления медиашлюзами	300
24.4. Протокол H.323.....	302
24.5. Сигнализация OKC7 поверх IP	303
24.5.1. Протокол управления потоками SCTP	304
24.5.2. Протоколы адаптации M2UA, M2PA и M3UA.....	304
24.5.3. Протоколы SUA и IUA	306
Ключевые слова.....	308
Контрольные вопросы	308
Задачи и упражнения.....	308
Литература к лекции 24	308
Лекция 25. Системы адресации и маршрутизации в СПД 309	
25.1. Нумерация и адресация.....	309
25.2. Принципы адресации в сетях IP	310
25.3. Протоколы поддержки системы адресации	315
25.4. Принципы маршрутизации датаграмм в сетях IP	316
25.5. Протоколы маршрутизации	317
25.6. Концепция ENUM.....	320
Ключевые слова.....	321
Контрольные вопросы	321
Задачи и упражнения.....	322
Литература к лекции 25	322
Лекция 26. Технологии поддержки новых услуг	
в сетях Интернет	323
26.1. Услуги IP-коммуникаций	323
26.2. Технология VoIP	324
26.3. Основные функции, реализуемые в сети VoIP	325
26.4. Архитектура сети VoIP	327
26.5. Сервер обработки вызовов	327
26.6. Шлюз	328
26.7. Особенности применения сети IP для передачи речи	329
26.8. Протокол RTP	330
26.9. Определение и основные свойства IPTV	331
26.10. Архитектура IPTV	332
Ключевые слова.....	334
Контрольные вопросы	334
Задачи и упражнения.....	334
Литература к лекции 26	334

Лекция 27. Традиционные услуги в сетях Интернет.....	335
27.1. Введение.....	335
27.2. Протокол пересылки файлов FTP.....	336
27.3. Протокол пересылки гипертекстовых сообщений HTTP341 и Всемирная паутина.....	337
27.4. Протокол электронной почты SMTP.....	339
Ключевые слова.....	340
Контрольные вопросы.....	340
Задачи и упражнения.....	340
Литература к лекции 27.....	340
Лекция 28. Качество обслуживания в СПД.....	341
28.1. Основные проблемы качества обслуживания в сетях IP.....	341
28.2. Работы ИТУ-Т по стандартизации качества обслуживания в IP- сетях.....	343
28.2.1. Рекомендация ИТУ-Т Y.1540.....	343
28.2.2. Рекомендация ИТУ-Т Y.1541.....	345
28.3. Механизмы обеспечения QoS в IP-сетях.....	346
28.3.1. Механизмы QoS в плоскости управления.....	346
28.3.2. Механизмы QoS в плоскости данных.....	346
28.3.3. Механизмы QoS в плоскости менеджмента.....	348
28.4. Основные модели обеспечения качества обслуживания в сетях IP.....	349
28.4.1. Модель предоставления интегрированных услуг (IntServ).....	349
28.4.2. Модель предоставления дифференцированных услуг ...	350
28.4.3. Механизм многопротокольной коммутации по меткам (MPLS).....	352
28.5. Оценка качества обслуживания в системах VoIP.....	352
28.5.1. Субъективные и объективные оценки качества обслуживания.....	352
28.5.2. Анализ искажающих факторов, влияющих на качество передачи речи в пакетных сетях.....	353
Ключевые слова.....	357
Контрольные вопросы.....	357
Задачи и упражнения.....	358
Литература к лекции 28.....	358
Лекция 29. Задачи расчета СПД.....	359
29.1. Особенности расчета сетей передачи данных.....	359
29.2. Расчет длительности задержек в узле коммутации пакетов....	360
29.3. Расчет вероятности потерь в узле коммутации пакетов.....	363
29.4. Особенности анализа мультимедийного трафика в сетях IP ...	366
29.5. Распределения для различных приложений в сетях IP.....	367
29.6. Задержки и потери в системах массового обслуживания, описываемых медленно затухающими распределениями.....	368

Ключевые слова	370
Контрольные вопросы	370
Задачи и упражнения	370
Литература к лекции 29	370

Лекция 30. Перспективы развития СПД..... 371

30.1. Проблемы роста сетей передачи данных	371
30.2. Переход к протоколу IPv6.....	373
30.3. Взрыв трафика IP, рост пропускной способности магистральных сетей и скоростей доступа в Интернет	374
30.4. Проект Internet2 (сеть Интернет следующего поколения).....	377
30.5. Заключительные замечания о будущем сети Интернет	378
Ключевые слова.....	380
Контрольные вопросы	380
Задачи и упражнения.....	380
Литература к лекции 30	380

Лекция 31. Заключительная 381

31.1. Краткие итоги	381
31.2. Эволюция сетей доступа	382
31.3. Система эксплуатационно-технического управления	386
31.4. Глобальная информационная инфраструктура.....	388
31.5. Вместо послесловия.....	389
Литература к лекции 31	389

Дополнительная литература390

Список сокращений.....392

Предметный указатель.....396

Именной указатель.....399

Предисловие

Однажды Лебедь, Рак да Щука...
И. А. Крылов

После знакомства с рукописью «Сети связи» мне захотелось последовать примеру авторов и предварить предисловие эпиграфом. Возможно, читатели вспомнили завершение басни Ивана Андреевича Крылова: «Да только воз и ныне там», но будут не совсем правы. Выбор эпиграфа связан с тем, что каждый из авторов написал несколько книг – в одиночестве или совместно с другими коллегами. Эта книга – их первый совместный труд. Известно, что писать вместе не всегда просто. Иногда – очень непросто. Это утверждение и определило выбор эпиграфа.

Лекции по основным аспектам построения, проектирования и эксплуатации сетей связи в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций читают преподаватели двух кафедр – «Сетей связи» и «Систем коммутации и распределения информации». Заведующие этими кафедрами, профессора Г. Г. Яновский и Б. С. Гольдштейн, а также присоединившийся к ним профессор кафедры «Систем коммутации и распределения информации» Н. А. Соколов, взяли на себя нелегкий труд – написать книгу «Сети связи», которая будет полезна и как учебник.

Последний раз учебник подобного рода был опубликован более двадцати пяти лет назад. Понятно, что произошли радикальные изменения практически во всех элементах сетей связи. Более того, появились новые сети и телекоммуникационные технологии, о которых двадцать пять лет никто не помышлял. Не только новые идеи и современные технологии стимулировали авторов. Сформировались новые подходы к обучению, а также иные правила представления информации в учебниках. Эти изменения продиктованы мировыми интеграционными процессами, затронувшими и высшую школу. Учебник отвечает современным требованиям технического и методологического характера.

Интересен и продуктивен выбранный авторами подход к изложению схожих аспектов в сетях трех видов: фиксированной телефонной связи, мобильных коммуникаций и документальной электросвязи.

Актуален важный постулат излагаемых положений, касающийся сближения трех сетей связи. Сформулирован основной принцип такого объединения – переход к сети связи следующего поколения, известной по аббревиатуре NGN (Next Generation Network).

Авторам удалось логично, компактно и совсем не скучно изложить базовые положения телекоммуникационных технологий и сетевой архитектуры, включая самые современные. Причем сделано это достаточно просто и понятно. Поэтому книга будет одинаково полезна студентам, инженерам, менеджерам, людям, работающим в телекоммуникациях или желающим познакомиться с этой бурно развивающейся индустрией. Процессу усвоения пройденного материала, несомненно, будут способствовать помещенные после каждой лекции ключевые слова, контрольные вопросы, задачи и упражнения, дополнительная литература.

Внимательно прочитав эту книгу, я не мог не испытать гордости за то, что она родилась именно у нас – в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Разумеется, учебник написан признанными в отрасли специалистами, профессорами, докторами наук, ее высокий уровень подтвердили рецензенты, тоже профессора и доктора наук. Но дело не только в этом. Чувствуется, что книга писалась увлеченно, в поисках, в дискуссиях и просто с удовольствием, чему, хочется верить, способствовала и атмосфера нашего общего с авторами Университета.

Теперь дело за студентами. Читайте, задавайте авторам вопросы (для этого ими и дан адрес сайта в Интернет), сами находите ответы в этой книге. Помните, что тот, кто знает, *как* работают современные телекоммуникационные сети, всегда найдет себе работу, а тот, кто знает, *почему* они так работают, будет у него начальником. Книга эта и для тех, и для других.

А. А. Гоголь,

ректор СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
заслуженный деятель науки,
доктор технических наук, профессор

Лекция 0

Вводная

*Чтобы что-то узнать, нужно уже что-то знать.
Станислав Лем*

0.1. Преамбула

Эта книга написана для студентов, изучающих курс «Сети связи». Она будет полезна аспирантам, исследования которых прямо или косвенно затрагивают разные аспекты построения, эксплуатации и развития телекоммуникационных сетей. Инженеры и менеджеры, работающие в области электросвязи, тоже найдут для себя полезные сведения.

Термин «Сеть связи» можно рассматривать с двух точек зрения. Во-первых, сеть связи, как самостоятельный объект, представляет собой комплекс технических средств, предназначенный для обмена информацией. Во-вторых, сеть связи – один из важных компонентов глобальной информационной инфраструктуры (ГИИ). Последнее понятие введено Международным союзом электросвязи (МСЭ)¹ в конце XX века, когда были завершены основные работы по формированию новой парадигмы совместного развития информатики и электросвязи. ГИИ рассматривается как совокупность сетей связи, оборудования пользователей, информационных и людских ресурсов.

Задача ГИИ заключается в обеспечении доступа к полезной информации и связи между абонентами, а также в создании качественно новых условий для работы, обучения и развлечений. Функциональные возможности ГИИ должны – в перспективе – предоставляться независимо от времени и места, по приемлемым тарифам и во всемирном масштабе.

¹ В книге используется аббревиатура на английском языке – ITU (International Telecommunication Union).

Начнем с модели, предложенной ИТУ для анализа телекоммуникационной системы любого вида. Эта модель, представленная на рис. 0.1, содержит четыре компонента, изображенных в виде облаков.

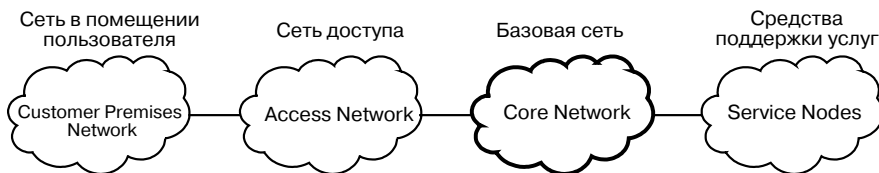


Рис. 0.1. Модель телекоммуникационной системы, предложенная ИТУ

Внутри каждого облака написано его общепринятое название на английском языке. Сверху приведен перевод, который обычно используется в отечественной технической литературе. Термин «сеть связи» относится к тем двум компонентам модели, которые входят в сферу ответственности Оператора связи.

В этой книге основное внимание акцентируется на облаке «Core Network» – базовой сети. Иногда эта сеть называется «транзитной», а в ряде ранних материалов ИТУ – «транспортной».

Согласно приведенному в качестве эпиграфа тезису, следует упомянуть о некоем минимуме миниморуме (*minimum minimorum*) знаний, без которого чтение книги будет малоэффективным. Во-первых, из школьной физики желательно помнить метрические приставки и их эквиваленты, сведенные здесь в табл. 0.1.

Таблица 0.1. Приставки, используемые в метрической системе мер

Приставка	Обозначение ²	Значение
Кило	<i>к / к</i>	10^3 (1000)
Мега	<i>М / М</i>	10^6 (1 000 000)
Гига	<i>Г / G</i>	10^9 (1 000 000 000)
Тера	<i>Т / T</i>	10^{12} (1 000 000 000 000)
Пета	<i>П / P</i>	10^{15} (1 000 000 000 000 000)
Экса	<i>Э / E</i>	10^{18} (1 000 000 000 000 000 000)
Зетта	<i>З / Z</i>	10^{21} (1 000 000 000 000 000 000 000)
Йотта	<i>Й / Y</i>	10^{24} (1 000 000 000 000 000 000 000 000)
Милли	<i>м / m</i>	10^{-3} (0,001)
Микро	<i>мк / μ</i>	10^{-6} (0,000·001)
Нано	<i>н / n</i>	10^{-9} (0,000·000·001)
Пико	<i>п / p</i>	10^{-12} (0,000·000·000·001)
Фемто	<i>ф / f</i>	10^{-15} (0,000·000·000·000·001)

² Указаны обозначения, принятые в отечественной и зарубежной литературе; они разделены знаком «/».

Для иллюстрации подобных значений приведем оценки информационных уровней цивилизации, основанные на количестве производимой информации. Эти оценки были предложены в [53]:

- *уровень 0* – информационная емкость мозга отдельного человека, составляющая 10 Мбит (10^7 битов);
- *уровень 1* – устное общение внутри общины деревни или племени, для которого объем циркулирующих сведений составляет порядка 1 Гбит (10^9 битов);
- *уровень 2* – письменная культура, примером которой может служить Александрийская библиотека с ее 532 800 свитками, в которых содержались 100 Гбит (10^{11} битов);
- *уровень 3* – книжная культура, включающая в себя также газеты и журналы, суммарный объем которой оценивается в 100 Пбит (10^{17} битов);
- *уровень 4* – информационное общество электронной обработки данных объемом 10^{25} битов, которому еще не присвоена общепринятая приставка (речь идет о величинах в десятки Йоттабитов согласно табл. 0.1).

Во-вторых, каждый из компонентов рассматриваемой модели состоит из некоей совокупности элементов, характерными примерами которых служат системы передачи и коммутации, а также линейно-кабельные сооружения. Следуя известным общесистемным принципам, эти элементы можно рассматривать как «черные ящики». Для полноценного восприятия материалов, изложенных в следующих тридцати лекциях, целесообразно знать основные принципы функционирования ряда «черных ящиков» – оборудования распределения информации и систем передачи, использующих разные среды распространения сигналов.

В-третьих, полезно знать базовые положения, определяющие важнейшие процессы передачи, обработки и распределения информации в современных сетях связи. От читателя, пожалуй, еще потребуются соответствие основным требованиям, которые приведены, например, в [30]:

- *общий уровень интеллекта* – умение понимать материал, способность воспринимать абстрактные принципы, умение рассуждать и оценивать;
- *владение словом* – способность понимать значения слов и эффективно пользоваться ими, выражать ясно свои мысли;
- *владение числом* – способность быстро и верно производить арифметические действия;
- *умение быстро читать*, способность воспринимать существенные детали в речи, в табличных материалах, печатных текстах.

Отметим, что соответствовать этим базовым требованиям совсем не просто. Нам, авторам, о таких читателях можно только мечтать.

К этим общим базовым знаниям и навыкам полезно прибавить теорему Котельникова и общие подходы к стандартизации сетей связи, чему посвящены следующие разделы этой лекции.

0.2. Теорема Котельникова

Многие операции, касающиеся обработки, передачи и распределения информации, заметно упрощаются, если электрический сигнал представлен в двоичной форме, то есть образует последовательность нулей и единиц. Принципы преобразования аналоговых функций в дискретные изучались, по крайней мере, с конца XIX века. Известны, в частности, работы математиков – англичанина Эдмунда Уиттекера и француза Эмиля Бореля, опубликованные в начале прошлого столетия.

В двадцатом столетии была доказана теорема, которой мы пользуемся в настоящее время. Доказательство теоремы было сделано независимо друг от друга шведским специалистом Гарри Найквистом, работавшим в знаменитой Лаборатории Белла, нашим соотечественником академиком Владимиром Александровичем Котельниковым и американским ученым Клодом Шенноном. В отечественной технической литературе чаще других используется название «Теорема Котельникова».

Суть теоремы Котельникова можно сформулировать следующим образом. Допустим, что аналоговый сигнал имеет спектр, ограниченный сверху частотой F_{max} . Такой сигнал может быть однозначно представлен дискретными отсчетами, которые взяты с периодом равным

$$\frac{1}{2 \times F_{MAX}}.$$

Отсчеты аналогового сигнала, взятые через промежутки времени, которые кратны периоду дискретизации, обычно округляются до ближайшей величины из множества фиксированных дискретных значений. Эта процедура называется квантованием. В сетях телефонной связи используется канал тональной частоты, для которого $F_{max}=3,4$ кГц. Для упрощения частота дискретизации принимается равной 2×4 кГц = 8 кГц. Иными словами, каждую секунду производит 8000 отсчетов аналогового сигнала.

В результате проведенных исследований было установлено, что для нормальной телефонной связи количество фиксированных дискретных значений сигнала можно ограничить числом 256. Для перехода от дискретного сигнала к цифровому каждый отсчет можно кодировать при помощи восьми элементов (битов). Это означает, что вместо аналогового сигнала может быть передана

последовательность дискретных сигналов со скоростью, равной произведению 8 кГц на 8 битов, то есть 64 кбит/с.

0.3. Стандартизация в области электросвязи

ITU – старейшая международная организация, занимающаяся разработкой рекомендаций, которые призваны обеспечить взаимодействие телекоммуникационных сетей разных стран. Формально эти рекомендации нельзя считать стандартами. Тем не менее, подавляющее большинство стран рассматривает рекомендации ITU именно как стандарты. Такая практика позволяет Операторам сетей электросвязи экономично обеспечивать взаимодействие телекоммуникационных систем, а производителям оборудования – продавать его на рынках других стран без существенной адаптации к национальным стандартам или стихийно принятым решениям.

В мае 1865 года в Париже была подписана конвенция о создании Международного Телеграфного Союза – International Telegraph Union. Россия была одной из стран, которые учредили эту межправительственную организацию. Конференция, состоявшаяся в 1932 году в Мадриде, решила объединить Международный Телеграфный Союз с аналогичной организацией, занимающейся вопросами радиосвязи. В результате появилось название ITU – International Telecommunication Union. Примечательно, что это преобразование не потребовало изменения аббревиатуры на английском языке – ITU. С 1947 года статус ITU изменился. Он стал специализированным учреждением Организации Объединенных Наций. Штаб-квартира ITU с 1948 года расположена в Женеве. В настоящее время (после ряда структурных изменений) основные рабочие органы ITU представлены тремя секторами:

- стандартизации электросвязи (ITU-T);
- радиосвязи (ITU-R);
- развития электросвязи (ITU-D).

В каждом из трех секторов образован ряд исследовательских комиссий, в которых ведется основная деятельность, связанная с разработкой рекомендаций и иных документов ITU. Следует отметить, что ITU работает в тесном контакте с рядом других международных, европейских, северо-американских и азиатских организаций, прямо или косвенно вовлеченных в работы, относящиеся к стандартизации в области связи.

С точки зрения вопросов развития телекоммуникационных сетей наибольший интерес представляют рекомендации сектора стандартизации электросвязи.

Перечень исследовательских комиссий сектора стандартизации электросвязи и названия серий рекомендаций, выпускаемых ИТУ, можно найти на сайте: <http://www.itu.int>. Там же размещены полезные документы, разработанные ИТУ.

В 1988 году был учрежден Европейский институт телекоммуникационных стандартов – ETSI. Его стандарты призваны обеспечить совместимость разных национальных систем электросвязи, что, в свою очередь, рассматривается как одно из условий эффективности интеграционных процессов в Европе.

Формально стандарты ETSI обязательны только для европейских стран. Ряд организаций, которые расположены за пределами Европы, стали членами ETSI. Этот факт обусловлен рядом причин, среди которых следует отметить эффективность работы ETSI и важный вклад Европы в развитие международных телекоммуникаций.

Основная работа ETSI в области стандартизации ведется техническими комитетами. Их перечень приведен на сайте: <http://www.etsi.org>. На этом же сайте можно найти подробную информацию, касающуюся организационных и технических аспектов работы ETSI.

ИТУ и ETSI по многим проблемам работают согласованно. Кроме того, они плодотворно сотрудничают с другими международными организациями. В частности, ИТУ и ETSI координируют свои работы с Международной организацией стандартизации (ISO), с Международной электротехнической комиссией (IEC), с организацией IETF (Internet Engineering Task Force), отвечающей за разработку стандартов для сети Интернет, а также с рядом консорциумов и форумов.

Принципы построения и эксплуатации отечественных телекоммуникационных сетей определяются Администрацией связи России. С весны 2008 года эти функции выполняет Министерство связи и массовых коммуникаций Российской Федерации.

0.4. Конвергенция сетей связи

Следует обратить внимание на тот уровень развития телекоммуникаций, который соответствует времени публикации этой книги. Обратимся к рис. 0.2. Он иллюстрирует три важные фазы эволюции сетей электросвязи, обеспечивающих интерактивные услуги, то есть возможность обмена информацией³.

К началу XXI века существовали три отдельных сети электросвязи. Их разделение обусловлено функциональными задачами, хотя эти сети иногда используют общие ресурсы (например, цифровые тракты, созданные в одном кабеле).

³ Сети звукового и телевизионного вещания, предназначенные для распределения информации, то есть для односторонней передачи ее от источника к получателям, в этой книге не рассматриваются.

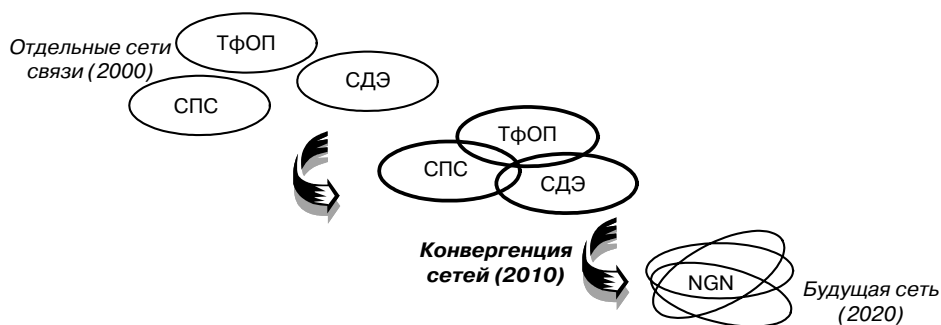


Рис. 0.2. Этапы эволюции сетей электросвязи

Тем не менее, телефонная сеть общего пользования (ТФОП), сеть подвижной связи (СПС) и сеть документальной электросвязи (СДЭ)⁴ – три разных объекта. Такова реальность мира телекоммуникаций начала XXI века. В книге каждой из этих трех сетей (ТФОП, СПС и СДЭ) посвящено по десять лекций.

В начале текущего столетия началось сближение трех отдельных сетей. Такой процесс называют *конвергенцией*. Определения, которые были предложены ИТУ для терминов «конвергентная сеть» и «конвергентные услуги», позволяют сделать вывод, что речь идет о процессах объединения (интеграции) сетей. Центральная часть рис. 0.2 отражает сегодняшнюю фазу конвергенции сетей за счет частичного (весьма небольшого) пересечения трех эллипсов, которые соответствуют ТФОП, СПС и СДЭ.

Результатом процесса конвергенции станет практически полное объединение сетей – правая часть рассматриваемого рис. 0.2. В итоге сформируется сеть следующего поколения (ССП), пока более известная по англоязычной аббревиатуре *NGN (Next Generation Network)*. В книге будет, в основном, использоваться сокращение *NGN*, привычное для большинства специалистов.

Процессу конвергенции в электросвязи свойственны очень интересные явления, которые служат современными примерами законов развития больших и сложных систем. В частности, по мере становления СДЭ связисты пытались с помощью разнообразных модемов, размещаемых отдельно или внутри телефонных аппаратов, факсимильных терминалов и персональных компьютеров, передавать дискретную информацию через ТФОП и (позже) СПС, созданные первоначально для передачи речи.

В конце XX века начался обратный процесс: переход к преобразованию речи в данные и их передача по цифровым сетям, изначально ориентированным на обмен дискретной информацией в форме пакетов.

⁴ Такое название сети определено образовательным стандартом. В технической литературе обычно используется термин «сети передачи данных».

Еще один переход – от информации одного вида (media) к *мультимедиа*. Речь идет о возможности обмена несколькими видами информации и о персональном управлении тем, что именно использует абонент для коммуникации, когда он это использует и в каком сочетании. В зависимости от ситуации и личных предпочтений абонент делает свой индивидуальный выбор из различных форм представления информации. Он может, например, услышать текст лекции в аудитории, прочитать его на экране, посмотреть о нем видеозапись или использовать некоторые комбинации этих возможностей.

0.5. Об этой книге

О том, *для кого* эта книга, было сказано в самом начале лекции.

О *чем* она, показано на первом рисунке (рис. 0.1). Находящееся в его центре и выделенное утолщенной линией облако *Core Network* составляет рассматриваемый в книге объект.

Центр следующего рисунка (рис. 0.2) показывает, в какой временной период следует читать эту книгу. Это отнюдь не означает, что после 2020 года в нее не будет нужды заглядывать. Есть все основания считать, что три сети: ТФОП, СПС и СДЭ просуществуют значительно дольше, как бы нам, связистам и абонентам, ни хотелось ускорить процесс их конвергенции.

Книга написана так, что ее можно читать как *вдоль* (лекции с нулевой по тридцать первую последовательно), так и *поперек*. Это высказывание заслуживает более подробного пояснения. Для чтения *вдоль* вся книга разделена на три части по десять лекций (глав) в каждой.

Первая часть (лекции 1 – 10) посвящена телефонным сетям общего пользования, вторые десять лекций (с 11 по 20) – сетям подвижной связи, а последняя, третья часть лекций (с 21 по 31) – сетям документальной электросвязи.

Книгу можно читать и *поперек*. В лекциях 1, 11 и 21 рассмотрены эволюция и основные понятия сетей ТФОП, СПС и СДЭ. Там же вводятся основные термины для соответствующих сетей, рассматриваются международные рекомендации и стандарты (ITU и ETSI в лекции 1, а в дополнение к ним – 3GPP в лекции 11 и IETF в лекции 21).

Сетевым аспектам ТФОП, СПС и СДЭ посвящены лекции 2, 12 и 22, а сетевые технологии рассмотрены в лекциях 3, 13 и 23. При этом лекция 2 посвящена архитектуре фиксированной телефонной сети, а лекция 12 – из второй части книги – охватывает разные поколения сетей подвижной связи 1G, 2G, 2,5G и 3G.

Лекция 13 целиком сосредоточена только на одной сетевой технологии – технологии GSM. В третьей части лекция 22 описывает виды сетевой архитектуры с виртуальными каналами, а лекция 23 целиком посвящена протоколам TCP/IP, определяющим архитектуру сети Интернет.

Протоколы сигнализации сетей связи последовательно описаны в лекциях 4, 14 и 24, а лекции 5, 15 и 25 посвящены нумерации и адресации – в ТФОП, СПС и СДЭ соответственно.

Тема лекций 6, 16 и 26 – технологии поддержки новых телекоммуникационных услуг. Для ТФОП – это рассматриваемые в лекции 6 технологии цифровой сети интегрального обслуживания, Интеллектуальной сети и компьютерной телефонии. Лекция 16 практически полностью посвящена средствам поддержки услуг СПС третьего поколения UMTS, а лекция 26 – поддержке передачи речи (VoIP) и телевидения (IPTV) по IP-сетям.

Сами же телекоммуникационные услуги рассматриваются в лекциях 7, 17 и 27, а проблемы оценки качества обслуживания (QoS) – в лекциях 8, 18 и 28. Аспекты исследования и расчета сетей связи рассматриваются в лекциях 9, 19 и 29, а завершающие каждую из трех частей лекции 10, 20 и 30 посвящены перспективам ТФОП, СПС и СДЭ. В последней лекции 31 упомянуто то, что не уместилось в предыдущих лекциях. В дополнение к этому «продольно-поперечному» подходу в книге есть еще некоторые особенности. Авторы вместе (да и каждый в отдельности) столько лет читают курсы лекций по сетям связи, что с учетом накопленного опыта позволили себе несколько отступить от традиций. В конце (а не в начале, как делается обычно) каждой лекции приводятся используемые ключевые слова. Они позволяют читателю еще раз осмыслить содержание и основные положения прочитанной лекции. После ключевых слов в конце каждой лекции (кроме этой) приводятся – тоже отмеченные специальными значками – контрольные вопросы, задачи и упражнения, а также перечень дополнительной литературы к каждой лекции.



Ключевые слова



Контрольные вопросы



Задачи и упражнения



Литература к лекции

Более подробный список использованных источников приведен в конце книги. Там же помещены именной и предметный указатели.

В дополнение к этому на сайте [http:// www.niits.ru](http://www.niits.ru) можно найти рекомендации и обсудить разные аспекты выполнения упражнений и решения задач, приведенных в конце лекций.

Часть 1

Телефонная сеть общего ПОЛЬЗОВАНИЯ

Лекция 1

Эволюция телефонных сетей

Ab initio.
(С самого начала)

1.1. Базовые понятия

Термин «телефония» давно используется в профессиональном лексиконе связистов. ИТУ-Т определяет телефонию как вид электросвязи, предназначенный, прежде всего, для обмена информацией в форме речи. Телефонная сеть устанавливает соединения, позволяющие передавать практически любую информацию в полосе пропускания канала тональной частоты (ТЧ). Эта полоса определена в диапазоне от 0,3 до 3,4 кГц.

ИТУ-Т предусматривает возможность использования так называемой широкополосной телефонии, когда речь передается в полосе пропускания, которая превышает диапазон канала ТЧ (например, от 0,1 до 7,0 кГц). Такая услуга предоставляется, в частности, цифровой сетью интегрального обслуживания ISDN (Integrated Services Digital Network), принципы построения которой рассматриваются в шестой лекции.

В первых десяти лекциях рассматривается ТФОП – телефонная сеть *общего пользования*. Последние два слова, выделенные курсивом, подчеркивают тот факт, что к сети может подключиться любой абонент, соблюдающий правила, которые оговариваются стандартным договором с Оператором (эксплуатационной компанией).

Такой принцип подключения к сети иногда называют *недискриминационным*. Существует ряд телефонных сетей, предназначен-

ных для обслуживания ограниченных групп пользователей. С технической точки зрения принципы создания и развития этих сетей и ТФОП очень схожи.

ТФОП стала первой сетью, которая обеспечила диалог (телефонный разговор) в реальном времени. По эффективности коммуникаций телефонный разговор уступает только дискуссии у «классной доски».

Другая важная особенность ТФОП заключается в том, что она приносит Оператору связи весьма существенные доходы. Пока их величина превышает доходы от всех остальных видов связи. Говоря о доходах ТФОП, подразумевают трафик речи, который создается терминалами фиксированной и мобильной связи. Аспекты создания сети, которая поддерживает функции мобильности терминала, рассматриваются в одиннадцатой лекции.

Понимал ли Александр Белл, какая судьба уготована его изобретению? До нас не дошли достоверные сведения о его гипотезах, касающихся возможных путей развития телефонной связи. Правда, задолго до изобретения телефона твердую уверенность в возможности общения людей, невзирая на большие расстояния, выразил Леонардо да Винчи¹. Пророчество гения сбылось в XX веке.

Базовые принципы создания ТФОП изложены в ряде монографий, опубликованных более двадцати пяти лет назад. В этой книге рассматриваются принципы построения ТФОП с учетом изменений, произошедших в последние десятилетия.

Во вводной лекции было отмечено, что основное внимание уделяется тому элементу телекоммуникационной системы, который назван «Базовой сетью» – Core Network в англоязычной технической литературе. Тем не менее, некоторые сведения, необходимые для изложения материала, содержат информацию о трех других элементах телекоммуникационной системы.

1.2. Краткий исторический экскурс

Дату, когда началось формирование ТФОП, установить не так просто. Известно, что в 1876 году Александр Грэхем Белл получил патент на изобретение электромагнитного телефона. Вскоре появились первые телефонные станции. Уже в 1878 году в городе Нью-Хейвен (США) открылась первая в мире телефонная станция. В России на ряде заводов Уфимской губернии телефонные станции для частного применения были установлены в 1880 году. Правда, совокупность подобных станций вряд ли можно рассматривать как сеть.

¹Люди будут разговаривать друг с другом из самых отдаленных стран и друг другу отвечать. (Леонардо да Винчи).

Первые в России городские телефонные станции общего пользования появились в 1882 году в Санкт-Петербурге, Москве и Одессе, а в 1885 году – в Киеве. Их можно считать элементами будущей ТФОП России. Началось формирование городских телефонных сетей (ГТС). Это означает, что были созданы важные компоненты ТФОП, но отсутствие возможности междугородной связи (и, тем более, международной) не позволяет говорить о рождении ТФОП.

31 декабря 1898 года состоялось официальное открытие междугородной линии телефонной связи между Санкт-Петербургом и Москвой – самой длинной в то время в Европе. Эту дату можно считать началом построения российской ТФОП. Постепенно всем абонентам ГТС стала доступна междугородная телефонная связь. Несколько позже такая возможность появилась у абонентов сельских телефонных сетей (СТС). Эти сети стали создаваться позже, чем были построены первые линии междугородной связи.

В качестве даты рождения международной связи чаще других упоминается 25 декабря 1900 года. В этот день было установлено первое соединение из города Ки Уэст (штат Флорида, США) в столицу Кубы. Расстояние между этими городами было меньше, чем длина линии между Санкт-Петербургом и Москвой, введенной в эксплуатацию на два года раньше. Формально в России первая международная линия начала свою работу в 1927 году между Москвой и Варшавой. Правда, связь столицы Российской империи с Гельсингфорсом (ныне столица Финляндии – Хельсинки) была введена в коммерческую эксплуатацию еще в мае 1917 года.

За время более чем столетнего существования ТФОП произошли радикальные изменения в технике телефонной связи, заметно увеличилось количество обслуживаемых абонентов, началось использование ресурсов сети для предоставления обслуживания других видов (например, для передачи факсимильных сообщений и обмена данными). Коммутационную станцию любого типа, как и большинство сложных систем, можно представить в виде двух взаимосвязанных блоков: управляющего и управляемого устройств. История развития устройств этих двух видов очень интересна.

Первые коммутационные станции предусматривали ручное управление установлением и завершением соединений. В этих станциях функции управления выполнял оператор. Он принимал на слух информацию о номере или ином идентификационном признаке вызываемого абонента и определял совокупность операций, позволяющих оптимально обслужить вызов. Логические функции выполнял человеческий мозг – самое совершенное устройство управления с точки зрения интеллектуальных возможностей. Не случайно в ряде самых современных систем телефонной связи все еще сохраняется ручное обслуживание.

По мере развития ТфОП проявился ряд отрицательных свойств ручного способа установления соединений. Переход к автоматизации ТфОП был обусловлен, по крайней мере, двумя факторами. Во-первых, к работе на телефонных коммутаторах пришлось бы привлечь слишком много людей. Во-вторых, человек не может совершать операции так же быстро, как автоматическое устройство. Иными словами, скорость установления соединения перестала удовлетворять требованиям абонентов ТфОП.

Совершенствование устройств управления было тесно связано с появлением новых поколений автоматических телефонных станций (АТС) электромеханического типа. Для каждого такого поколения (машинные, декадно-шаговые и координатные АТС) были разработаны свои устройства управления. Идея применения программного управления родилась в тот период времени, когда дальнейшее совершенствование координатных АТС оказалось нецелесообразным.

Практически в это же самое время основные этапы развития управляющих и управляемых устройств перестали совпадать. Устройства управления, следуя логике развития вычислительной техники, прошли путь, который можно представить такой последовательностью: централизованные, децентрализованные и распределенные.

Классифицировать управляемые устройства лучше всего по способу построения коммутационного поля. Первым широко используемым коммутационным полем, по всей видимости, стала доска Гилеланда. Она обеспечивала однопроводную коммутацию. Для декадно-шаговых АТС были разработаны искатели. Они делились на два типа: шаговые и декадно-шаговые. В этих искателях управляющее и управляемое устройства были объединены в единый прибор.

Следующее поколение АТС – координатные станции строилось на соединителях. Каждый координатный соединитель можно рассматривать как матрицу с m входами и n выходами.

В координатных АТС управляющие (регистры и маркеры) и управляемые (соединители) устройства были конструктивно отделены друг от друга. Идея построения управляемого устройства на матричных принципах была использована и в следующем поколении АТС – квазиэлектронных станциях. Каждый коммутационный элемент подобного устройства (геркон или гезакон) представлял собой миниатюрный стеклянный баллон, внутри которого были помещены контактные пружины. Такое решение существенно улучшило качество цепи, образованной при замыкании контактов геркона или гезакона.