Н.А. СОКОЛОВ

В каждой естественной науке
заключено столько истины,
сколько в ней есть математики.
(Иммануил Кант. "Метафизические
начальные основы естественной науки")

ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

2012 год

ГРНТИ 49.33.29
УДК 621.395
ББК 32.883
С 59

Н.А. Соколов. Задачи планирования сетей электросвязи. – СПб.: Техника связи, 2012. –432 с.

В монографии изложены методы решения задач, возникающих в процессе планирования телекоммуникационных сетей. Основное внимание уделено трем аспектам планирования. Во-первых, необходимо получить ряд прогностических оценок, которые позволят уяснить базовые требования к инфокоммуникационной системе в целом, меняющиеся в процессе ее эволюции. Во-вторых, следует выбрать структуру сети с учетом возможных изменений, определяемых развитием инфокоммуникационной системы. В-третьих, должны быть рассчитаны величины пропускной способности используемых транспортных ресурсов и производительности устанавливаемых узлов коммутации с учетом всех нормированных показателей качества обслуживания для мультисервисного трафика.

Монография предназначена для специалистов, занимающихся вопросами проектирования современных телекоммуникационных сетей. Она будет полезна студентам, изучающим дисциплины, в которых затрагиваются проблемы построения и развития сетей связи. Ее можно рекомендовать аспирантам, чьи исследования связаны с решением задач по трем перечисленным выше аспектам планирования телекоммуникационных сетей.

N.A. Sokolov. The planning of telecommunication networks. – St. Petersburg: "Technology of telecommunications", 2012. – 432 p.

The book presents methods of solving problems that arise in the planning of telecommunication networks. It is focused on three aspects of planning. Firstly, it is necessary to obtain a number of forecasts which will clarify the key requirements for the infocommunications system as a whole changing in the process of its evolution. Secondly, it is needed to select the network structure, taking into account possible changes determined by the development of infocommunications systems. Thirdly, the values for transport resources bandwidth and switching nodes performance should be calculated with the standardized quality of service.

The book is intended for professionals involved in the design of modern telecommunications networks. It will be useful to students learning telecommunication networks. It can be recommended to graduate students whose studies are related to the solution of problems on the three above mentioned aspects of telecommunications networks planning.

Рецензенты:
доктор физико-математических наук, профессор В.К. Попков
доктор технических наук, профессор М.А. Шнепс-Шнеппе

© Н.А. Соколов, 2012
© ООО «Техника связи», оформление 2012

ISBN 978-5-905613-05-0

Содержание

Список принятых сокращений....6
Предисловие....10
1. Задачи планирования сети....12
1.1. Классификация задач планирования сети....12
1.2. Математические модели телекоммуникационных сетей....25
1.2.1. Два основных типа моделей....25
1.2.2. Общие сведения о графах....26
1.2.3. Классификация систем массового обслуживания....29
1.3. Декомпозиция математических моделей....33
1.4. Наиболее сложные задачи планирования сетей....36
1.4.1. Причины усложнения некоторых задач....36
1.4.2. Изменение структуры телекоммуникационной сети....37
1.4.3. Выбор используемых технологий....41
1.4.4. Оценка обслуживаемого трафика....42
1.4.5. Прогнозирование требований к телекоммуникационной сети....44
1.4.6. Аспекты принятия решения....46
1.5. Комментарии к первой главе....50
1.5.1. Модель инфокоммуникационной системы....50
1.5.2. "Условная" телекоммуникационная сеть....51
1.5.3. Сценарный подход к развитию инфокоммуникационной системы....52
Литература к Главе 1....58
Использованные источники....58
Перечень дополнительной литературы к Главе 1....61
2. Методы расчета транспортной сети....63
2.1. Процесс планирования транспортной сети....63
2.2. Прогнозирование характеристик транспортной сети....65
2.2.1. Выбор метода прогнозирования....65
2.2.2. Пропускная способность линий передачи....68
2.2.3. Показатели надежности транспортной сети....72
2.2.4. Среда передачи....76
2.3. Сценарии построения транспортной сети....80
2.3.1. Классификация основных сценариев....80
2.3.2. Сценарии, различающиеся функциональными возможностями....82
2.3.3. Сценарии, различающиеся структурой транспортной сети....83
2.3.4. Сценарии, различающиеся используемыми технологиями....85
2.3.5. Типичные сценарии модернизации транспортных сетей....85
2.3.6. Выбор кольца для включения СУ....99
2.3.7. Включение новых СУ....101
2.3.8. Оценка ресурсов для резервирования сети доступа....103
2.4. Методы расчета транспортной сети....105
2.4.1. Перечень основных задач....105
2.4.2. Основные проблемы эксплуатируемой сети....106
2.4.3. Этапы модернизации эксплуатируемой сети....111
2.4.4. Паспортизация транспортных ресурсов....117
2.4.5. Поддерживаемые виды обслуживания....120
2.4.6. Показатели качества обслуживания....125
2.4.7. Пропускная способность....127
2.4.8. Структура транспортной сети на разных уровнях иерархии....129
2.4.9. Пропускная способность линий передачи....138
2.4.10. Принципы резервирования ресурсов транспортной сети....139
2.5. Дополнения ко второй главе....141

2.5.1. Некоторые особенности развития транспортных сетей 141
2.5.2. Что такое широкополосный доступ? 143
2.5.3. Публикации по тематике второй главы 144
Литература к Главе 2 145
Использованные источники 145
Перечень дополнительной литературы к Главе 2 149
3. Методы расчета коммутируемых сетей 152
3.1. Особенности планирования коммутируемых сетей 152
3.2. Прогнозирование характеристик коммутируемых сетей 155
3.2.1. Исследуемые процессы и постановка задачи 155
3.2.2. Типичные группы пользователей 156
3.2.3. Изменения в типичных группах пользователей 159
3.2.4. Выбор прогностических кривых 160
3.2.5. Оценка производительности средств распределения информации 163
3.2.6. Пример разработки прогнозов 165
3.2.7. Повышение точности прогнозов 170
3.3. Сценарии развития коммутируемых сетей 173
3.3.1. Классификация сценариев развития коммутируемых сетей 173
3.3.2. Выбор структуры коммутируемой сети 175
3.3.3. Сценарии модернизации сетей доступа 189
3.3.4. Численные оценки сценариев развития коммутируемых сетей 194
3.4. Методика расчета коммутируемой сети 200
3.4.1. Перечень основных задач 200
3.4.2. Выбор структуры сети доступа 201
3.4.3. Расчет производительности узлов коммутации 211
3.4.4. Об оценке проектных решений 218
3.5. Дополнения к третьей главе 219
3.5.1. Оценка пропускной способности при резервировании ресурсов 219
3.5.2. Новые возможности использования штрафных функций 220
3.5.3. Термины в современной электросвязи 221
Литература к Главе 3 222
Использованные источники 222
Перечень дополнительной литературы к Главе 3 227
Послесловие 229
Приложение 1. Теория вероятностей. Преобразование Лапласа-Стилтьеса 231
П1.1. Основы теории вероятностей 231
П1.2. Преобразование Лапласа-Стилтьеса 241
П1.3. Применение ступенчатых функций распределения 243
Литература к Приложению 1 245
Приложение 2. Некоторые разделы теории телетрафика 247
П2.1. Модель системы массового обслуживания 247
П2.2. Потоки заявок 248
П2.3. Длительность обслуживания заявок 252
П2.4. Дисциплины обслуживания заявок 254
П2.5. Классификация систем массового обслуживания 257
П2.6. Аспекты качества обслуживания 259
П2.7. Несколько положений теории телетрафика 261
П2.8. Однолинейная система с явными потерями 267
П2.9. Две простейшие системы с ожиданием 269
Литература к Приложению 2 274
Приложение 3. Структурные характеристики сети доступа 275
П3.1. Оценка длины линий передачи 275
П3.2. Оценка надежности сети доступа 290

Литература к Приложению 3 295
Приложение 4. Методы прогнозирования в электросвязи....296
П4.1. Выбор метода прогнозирования 296
П4.2. Особенности прогнозирования пропускной способности 305
П4.3. Аспекты прогнозирования поддерживаемых услуг....306
П4.4. Повышение точности прогнозов....307
Литература к Приложению 4 315
Приложение 5. Сценарии формирования ССП 317
П5.1. Методологический подход к построению ССП 317
П5.2. Модернизация телефонной сети без узлов 317
П5.3. Модернизация телефонной сети с УВС 322
П5.4. Модернизация телефонной сети с УИС и УВС....327
П5.5. Модернизация сельской телефонной сети....333
П5.6. Прагматическая стратегия построения ССП 336
П5.7. Концепция "Расширяющееся ядро"....341
П5.8. Несколько замечаний по рисункам и по терминологии....342
Литература к Приложению 5 343
Приложение 6. Методы расчета однолинейных СМО 344
П6.1. Исследуемые характеристики 344
П6.2. Системы с простейшим входящим потоком....345
П6.3. Системы с произвольным характером входящего потока 359
П6.4. Однолинейные системы с относительными приоритетами 370
Литература к Приложению 6 378
Приложение 7. Методы планирования IP сетей....380
П7.1. Анализ сетей массового обслуживания 380
П7.2. Процессы обмена IP-пакетами....385
П7.3. Распределение норм на показатели QoS по компонентам сети....390
П7.4. Задачи планирования сети с точки зрения показателей QoS....393
П7.4.1. Распределение трафика между узлами сети 393
П7.4.2. Оценка величины трафика, создаваемого IP-пакетами 397
П7.4.3. Анализ предельных значений трафика 401
П7.5. Направления дальнейших исследований 404
Литература к Приложению 7 407
Приложение 8. Краткая информация о сетях доступа....409
П8.1. Исторические аспекты 409
П8.2. Требования инфокоммуникационной системы....411
П8.3. Услуги и технологии....416
П8.4. Структура сети доступа 419
П8.5. Дальнейшая эволюция сетей доступа 424
Литература к Приложению 8 426

Список принятых сокращений

Некоторым терминам присущи аналогичные по смыслу аббревиатуры в русском и в английском языках. В таких случаях после аббревиатуры на русском языке в скобках приводится сокращение, обычно используемое в англоязычной технической литературе.

I. Аббревиатуры на русском языке

АЛ – абонентская линия
АМТС – автоматическая междугородная телефонная станция
АТС – автоматическая телефонная станция
БС – базовая станция
БШД (BWA) – беспроводный широкополосный доступ
ВВП (GDP) – валовой внутренний продукт
ВВХ – вероятностно-временные характеристики
ВЛС – воздушная линия связи
ВМ – выносной модуль
ГТС – городская телефонная сеть
ДВО – дополнительные виды обслуживания
ЗСЛ – заказно-соединительная линия
ЕС (EU) – Европейский Союз
ЕФП – единичная функция полезности
ЗПП – зона прямого питания
ИКМ (PCM) – импульсно-кодовая модуляция
ИПС (UNI) – интерфейс пользователь-сеть
ИС (IN) – Интеллектуальная сеть
К (C) – концентратор
КЛС – кабельная линия связи
КТВ (CATV) – кабельное телевидение
ЛОР – лицо, обосновывающее решение
ЛПР – лицо, принимающее решение
ЛЭП – линия электропередачи
М – маршрутизатор
МАК (MSAN) – мультисервисный абонентский концентратор
МАС – Международная академия связи
МВК (ADM) – мультиплексор ввода/вывода каналов
МК – магистральный коммутатор
МКД – мультисервисный коммутатор доступа
МРК – межрегиональная компания
МС (LE) – местная станция
МСЭ (ITU) – Международный союз электросвязи
МТА – мобильный телефонный аппарат
МЦК – международный центр коммутации
МЭК (IEC) – Международная электротехническая комиссия
ОВ (FO) – оптическое волокно
ОКС – общий канал сигнализации
ОМВК (OADM) – оптический мультиплексор ввода/вывода каналов
ОС – оконечная станция
ОЦК – основной цифровой канал
ПД – передача данных
ПК (PC) – персональный компьютер
РАТС (CO, LE) – районная АТС
РК (DP) – распределительная коробка
РРЛ – радиорелейная линия

РТ – телефонная розетка
СЕ (SU) – сигнальная единица
СеМО – сеть массового обслуживания
СЛ – соединительная линия
СЛМ – соединительная линия для междугородной связи
СМО – система массового обслуживания
ССП – сеть следующего поколения
СТС – сельская телефонная сеть
СУ – сетевой узел
Т – терминал
ТА (TS) – телефонный аппарат
ТВ – телевизионный приемник
ТВЧ – телевидение высокой четкости
ТЗ – техническое задание
ТК – транзитный коммутатор
ТС – транзитная станция
ТФОП (PSTN) – телефонная сеть общего пользования
ТЧ (VF) – тональная частота
УАК – узел автоматической коммутации
УАТС (PABX) – учрежденческая АТС
УВС – узел входящего сообщения
УВСМ – узел входящего сообщения для междугородной связи
УИВС – узел исходящего и входящего сообщения
УИС – узел исходящего сообщения
УС – узловая станция
УСП – узел сельско-пригородной связи
УУ – управляющее устройство
ФР (d.f.) – функция распределения
ЦКМС (MSC) – центр коммутации мобильной связи
ЦКП – центр коммутации пакетов
ЦКУ (DXC) – цифровой кроссовый узел
ЦС – центральная станция
ЦСИО (ISDN) – цифровая сеть интегрального обслуживания
ЦСП – цифровая система передачи
ЧНН – час наибольшей нагрузки
ШР – шкаф кабельный распределительный

II. Аббревиатуры на английском языке

ADSL – Asymmetrical Digital Subscriber Line (асимметричная цифровая АЛ)
ARPU – Average Revenue per Subscriber (средний доход на одного абонента)
ATM – Asynchronous Transfer Mode (асинхронный режим переноса)
BWA – Broadband Wireless Access (широкополосный беспроводный доступ)
CRM – Customer Relationships Management (управление взаимоотношениями с клиентами)
DCME – Digital Circuit Multiplication Equipment (оборудование уплотнения цифровых каналов)
DSLAM – Digital Subscriber Line Access Multiplexer (мультиплексор доступа для цифровых абонентских линий)
DSL – Digital Subscriber Line (цифровая АЛ)
DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing (компактное спектральное уплотнение)
EoX – Ethernet over X (Ethernet поверх технологии X)

E1 – стандартный цифровой тракт с пропускной способностью 2048 кбит/с

ETSI – European Telecommunications Standards Institute (Европейский институт телекоммуникационных стандартов)

FIFO – First In, First Out (первым пришел – первым обслужен)

FiWi – Fiber-Wireless Broadband Access Network (широкополосная сеть доступа на основе оптических и беспроводных технологий)

FTTA – Fiber To The Apartment (доведение кабеля с ОВ до квартиры)

FTTB – Fiber To The Building (доведение кабеля с ОВ до здания)

FTTC – Fiber To The Curb (доведение кабеля с ОВ до места установки кабельного шкафа)

FTTD – Fiber To The Desk (доведение кабеля с ОВ до рабочего места)

FTTH – Fiber To The Home (доведение кабеля с ОВ до жилого дома)

FTTO – Fiber To The Office (доведение кабеля с ОВ до офиса)

FTTP – Fiber To The Premises (доведение кабеля с ОВ до помещения клиента)

FTTR – Fiber To The Remote (доведение кабеля с ОВ до удаленного модуля – концентратора, мультиплексора или УАТС)

FTTx – Fiber To The "x" (волокно до точки "*x*")

GII – Global Information Infrastructure (глобальная информационная инфраструктура)

HDTV – High Definition Television (телевидение высокой четкости)

HFC – Hybrid Fiber/Coax (комбинированная среда "волокно-коаксиал")

IAD – Integrated Access Device (устройство интегрированного доступа)

IP – Internet Protocol (протокол Интернет)

IPDV – IP packet delay variation (вариация задержки IP-пакетов)

IPER – IP packet error ratio (доля искаженных IP-пакетов)

IPLR – IP packet loss ratio (доля потерянных IP-пакетов)

IPTD – IP packet transfer delay (задержка переноса IP-пакетов)

ISO – International Standards Organization (Международная организация по стандартизации)

LAN – Local Area Network (локальная вычислительная сеть, локальная сеть)

LIFO – Last In, First Out (последним пришел – первым обслужен)

LMDS – Local Multipoint Distribution Services ("сотовое телевидение" или услуги распределения информации для группы терминалов местной сети)

MG – Media Gateway (транспортный шлюз)

MGC – Media Gateway Controller – (контроллер транспортного шлюза)

MMDS – Multichannel Multipoint Distribution Service ("сотовое телевидение" или услуги многоканального распределения информации для группы терминалов)

MOS – Mean Opinion Score (средняя экспертная оценка качества речи)

MPLS – MultiProtocol Label Switching (многопротокольная коммутация по меткам)

MVDS – Multipoint Video Distribution System ("сотовое телевидение" или система распределения видеоинформации для группы терминалов)

NGN – Next Generation Network (сеть связи следующего поколения)

NPV – Net Present Value (чистая текущая стоимость)

OA&M – Operation, Administration and Maintenance (техническая эксплуатация)

PLC – Power Line Communication (связь по линиям электропередачи)

PON – Passive Optical Network (пассивная оптическая сеть)

POTS – Plain Old Telephone Services – услуги традиционной телефонии

QoS – Quality of Service (качество обслуживания)

RPR – Resilient Packet Ring (устойчивое пакетное кольцо)

RTP – Real-Time Transport Protocol (транспортный протокол реального времени)

SCN – Switched Communications Network (коммутируемая телекоммуникационная сеть)

SDH – Synchronous Digital Hierarchy (синхронная цифровая иерархия ЦСП)

SG – Signalling Gateway (шлюз сигнализации)

SLA – Service Level Agreements (соглашения об уровне обслуживания)

SP – Signaling Point (пункт сигнализации)

STB – Set-Top Box (компьютерная приставка к телевизору)

SOHO – Small Office / Home Office (небольшой офис / офис в жилом помещении)

STM – Synchronous Transfer Mode (синхронный режим переноса)

SWOT – Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats (сильные и слабые стороны, возможности, угрозы)

TIPHON – Telecommunications and Internet Protocol Harmonization Over Networks (проект ETSI по гармонизации сетей с коммутацией каналов и пакетов)

UDP – User Datagram Protocol (протокол передачи дейтаграмм пользователя)

UNI – User Network Interface (интерфейс пользователь-сеть)

VDSL – Very High-speed Digital Subscriber Line (цифровая АЛ со сверхвысокой скоростью передачи информации)

VoIP – Voice over IP (передача речи через сеть, основанную на протоколе IP; обычно эта аббревиатура ассоциируется с IP-телефонией)

WiMAX – Worldwide Interoperability for Microwave Access (система широкополосного беспроводного доступа)

WLL – Wireless Local Loop (беспроводная АЛ)

SHDSL – Symmetric High-Bitrate Digital Subscriber Line (симметричная цифровая АЛ с высокой скоростью обмена данными)

xDSL – x Digital Subscriber Line (цифровая АЛ; общее обозначение для ряда технологий цифровой абонентской линии)

XoIP – X over IP (передача любой информации через сеть, основанную на протоколе IP)

Наука необходима народу. Страна, которая ее не развивает, неизбежно превращается в колонию.
(Фредерик Жолио-Кюри)

Предисловие

Уважаемый Читатель! Перед Вами монография, посвященная задачам, которые решаются при *планировании* современных телекоммуникационных сетей. В основном речь идет о сети следующего поколения (ССП). Она известна также по аббревиатуре NGN – Next Generation Network. Прочитав название, Вы, наверное, зададите два вопроса:

- Что такое "планирование сети"?
- Каким именно задачам планирования посвящена монография?

Общепринятого объяснения для словосочетания "планирование сети" *(network planning*) не существует. Во многих публикациях оно используется применительно к группе важнейших задач, решаемых в процессе проектирования сети (*network designing*). Такими задачами в планировании сети считаются выбор ее структуры, расчет пропускной способности и производительности основных элементов, а также оценка экономических показателей. В отечественной практике проектирования сетей термин "network planning" иногда рассматривается как "системный проект", что весьма удачно отражает перечень выполняемых операций и ожидаемых результатов.

Соображения, изложенные в предыдущем абзаце, фактически содержат ответ на второй вопрос. Это означает, что в монографии:

- не рассматриваются методы расчета электрических параметров каналов и трактов, используемых в ССП, а также принципы проектирования кабельной канализации, антенных мачт и им подобных сооружений;
- не затрагиваются проблемы, касающиеся системы технической эксплуатации телекоммуникационного оборудования;
- не упоминается и ряд других задач, важных для перехода к сети следующего поколения.

В самом общем виде цель монографии можно сформулировать так: *разработать базовые методы планирования сети связи следующего поколения, отвечающей заранее сформулированным требованиям Оператора, источник которых – ключевые тенденции развития инфокоммуникационной системы в целом.* Предлагаемые методы планирования учитывают возможность использования разных сценариев для создания и развития сети связи следующего поколения, а не единственного решения, считающегося оптимальным. Такой подход обусловлен рядом соображений. Соответствующие аргументы изложены в первой главе монографии.

Значительное внимание уделяется сети доступа, что объясняется двумя причинами. Во-первых, модернизация сети доступа требует решения ряда сложных задач. Во-вторых, я предполагал опубликовать монографию, посвященную методам расчета сетей доступа. Она была задумана как продолжение книги "Сети абонентского доступа. Принципы построения", изданной в 1999 году. Ее электронную версию можно найти в разделе "Монографии" сайта http://sokolov.niits.ru. По ряду причин книга по методам расчета сетей доступа не была написана. Подготовленные материалы вошли в эту монографию. Следует упомянуть, что некоторые положения из книги "Сети абонентского доступа. Принципы построения" уточнены с учетом концепции ССП. Этим вопросам посвящено последнее Приложение к монографии.

Несколько слов о структуре монографии. Ее главы написаны с минимальным использованием формул. Такой подход объясняет наличие ряда Приложений, в которых приведены математические выкладки, интересные с точки зрения решения задач по планированию сети.

Первую главу следует рассматривать как постановочную. В ней сформулированы базовые принципы, связанные с задачами планирования телекоммуникационной сети. Во второй главе рассматриваются вопросы, актуальные для транспортных сетей. Один из

важных обсуждаемых аспектов – расчет пропускной способности транспортной сети, предназначенной для ССП. Третья глава посвящена коммутируемым сетям. В ней также основное внимание концентрируется на задачах, возникающих при реализации концепции ССП.

Монография содержит восемь Приложений. В них изложены материалы, которые относятся к следующим темам:

- справочная информация по основам теории вероятностей и преобразования Лапласа-Стилтьеса;
- ряд разделов теории телетрафика, которые существенны с точки зрения задач, рассматриваемых в монографии;
- результаты исследования структурных характеристик сети доступа;
- методы прогнозирования, которые целесообразно использовать при анализе инфокоммуникационной системы;
- концептуальные положения по формированию сети следующего поколения;
- методы расчета однолинейных систем массового обслуживания, служащих моделями элементов сети следующего поколения;
- методы планирования сетей, построенных на технологии IP (Internet Protocol – протокол Интернет);
- краткая информация о сетях доступа, дополняющая те положения, которые были изложены в книге "Сети абонентского доступа. Принципы построения".

К сожалению, перемещение части материалов в Приложения, привело к повторам ряда положений. Выбор структуры монографии объясняется тем, что далеко не все читатели станут знакомиться с текстом Приложений. По этой причине ряд важных, на мой взгляд, соображений может быть ими пропущен. Я попытался написать все три главы монографии как цельный текст, понятный без обращения к Приложениям.

Новые материалы и перечень найденных опечаток будут размещаться на моей домашней странице. Такой подход был апробирован после издания монографии "Телекоммуникационные сети". Судя по отзывам читателей, он оказался эффективным.

Если Вам, уважаемый Читатель, монография покажется интересной, то в этом есть несомненная заслуга моих *Учителей* – Р.А. Авакова, Б.С. Лившица, Н.П. Мамонтовой, М.М. Подвидза, Б.Р. Сергиевского, Г.Г. Яновского и многих других преподавателей ЛЭИС. Теперь ЛЭИС называется Санкт-Петербургским Государственным Университетом Телекоммуникаций имени профессора М.А. Бонч-Бруевича. В нем я учился, защитил кандидатскую и докторскую диссертации, стал читать лекции на кафедре "Системы коммутации и распределение информации". Мне повезло с *Учителями* и после окончания университета. Я очень рад, что работал с Л.Е. Варакиным, А.И. Васильченко, Л.М. Гольштейном, Я.С. Дымарским, И.Е. Павловским, В.А. Соколовым, Я.В. Фидлиным, П.А. Юнаковым.

Редакторская работа выполнена моей женой, Марией Соколовой. Все программы для проведения расчетов составлены нашим младшим сыном Андреем. Совместно с ним написан ряд разделов второго, шестого и седьмого Приложений. В подготовке рукописи к печати принял участие и наш старший сын Юрий. Он разработал дизайн обложки.

Все финансовые заботы об издании книги взял на себя научно-технический центр "Протей". Я благодарен коллегам из компании "Протей" еще и за интересные дискуссии по важным вопросам, касающимся развития сетей электросвязи. Более пятнадцати статей написаны мною в соавторстве с сотрудниками научно-технического центра "Протей".

Quis? quid? ubi? quibus auxiliis?
cu? quomodo? quando?
(Кто? что? где? при чьей помощи?
для чего? каким образом? когда?)

1. Задачи планирования сети

Qui veut dire tout, ne dira rien.
(Кто хочет говорить обо
всем, не скажет ничего)

1.1. Классификация задач планирования сети

Давайте начнем с эпиграфов к этой главе и к ее первому разделу. Фраза "Quis? quid? ubi? quibus auxiliis? cu? quomodo? quando?", используемая в риторике и в криминалистике, отражает основную цель первой главы – проанализировать задачи, которые возникают в процессе планирования сетей, с разных точек зрения. Эпиграф к этому разделу, если отнестись к нему формально, отражает иную точку зрения: перевести все рассуждения в плоскость конкретных решений. Это противоречие хорошо знакомо исследователям, пытающимся пройти между Сциллой и Харибдой – теорией и практикой.

В этом разделе предлагается классификация задач, прямо или косвенно связанных с планированием сетей электросвязи. Классификация включает также задачи, которые не рассматриваются в монографии. Такой подход (рисунок 1.1) позволит сконцентрировать усилия на выбранном перечне решаемых задач и, одновременно, обратить внимание читателей на проблемы, которые, по каким-либо причинам, не рассматриваются в данной монографии.

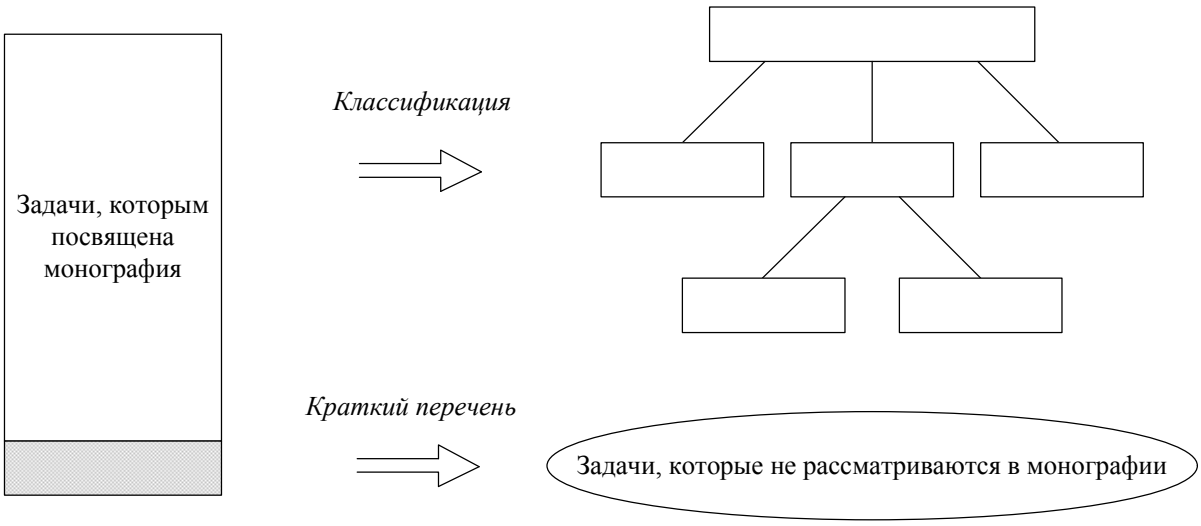


Рисунок 1.1. Задачи планирования сети электросвязи

Сначала будут перечислены задачи, на которых акцентируется основное внимание. Перечень задач, которые в монографии не рассматриваются, приведен в конце раздела. Классифицировать задачи планирования сети можно разными способами. Для выбора разумного способа классификации целесообразно выделить основные этапы в процессе планирования телекоммуникационной сети.

В самом общем виде этот процесс может быть представлен алгоритмом, который показан на рисунке 1.2. Этот алгоритм подразумевает, что процесс планирования сети начинается с решения двух задач. Во-первых, должны быть тщательно изучены основные характеристики эксплуатируемых сетей. В некоторых случаях достаточно рассмотреть только одну (основную) сеть. Во-вторых, необходим анализ перспективных требований, которым должна отвечать инфокоммуникационная система.

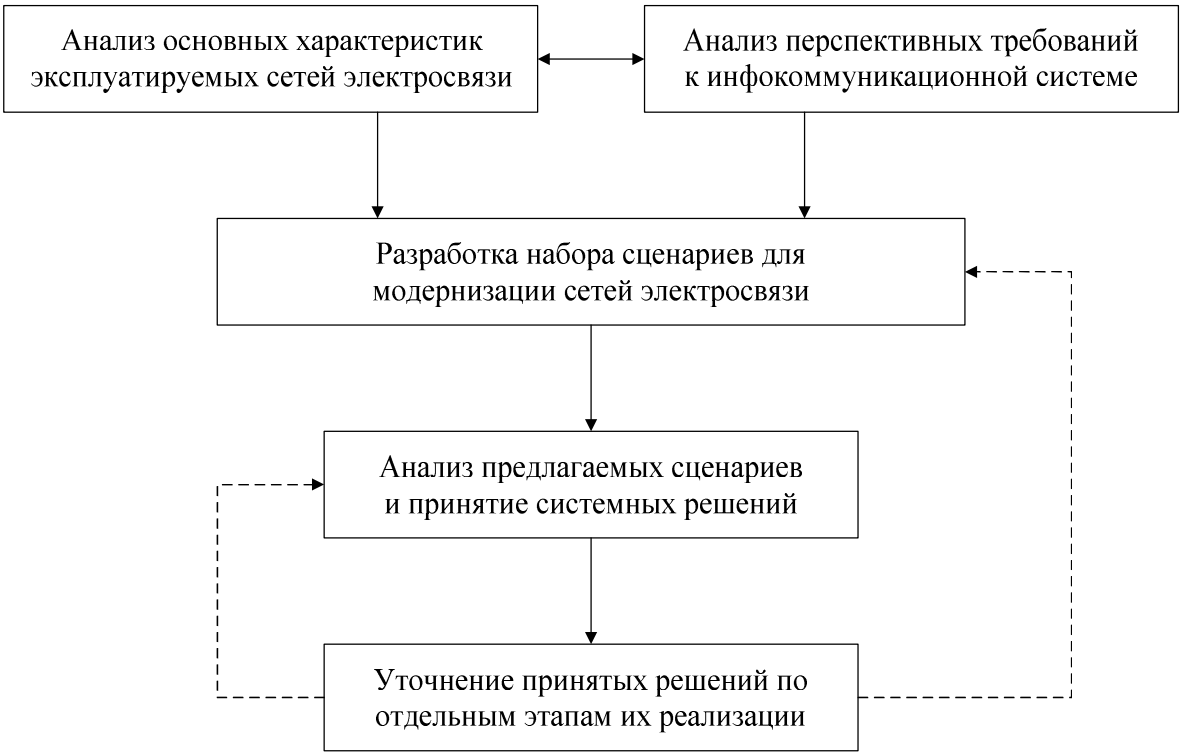


Рисунок 1.2. Процесс планирования телекоммуникационной сети

Формулировки задач содержатся в двух блоках, изображенных в верхней части рисунка 1.2. Словосочетание "основные характеристики" (левый прямоугольник) может быть конкретизировано только после завершения анализа целей, сформулированных в техническом задании (ТЗ) на выполнение проектных работ. Эти цели, в свою очередь, выбираются Оператором или владельцем сети электросвязи. Выбор цели, как правило, базируется на результатах анализа требований инфокоммуникационной системы, которые выявляются после получения прогностических оценок. Кроме того, при выборе цели важными факторами становятся финансовые возможности Оператора или владельца сети, ожидаемые действия конкурентов и результаты исследования возникающих рисков.

Цель проектирования и планирования, независимо от сделанного выбора, можно сформулировать так [1]: *работающая сеть связи, генерирующая доходы и отвечающая ожиданиям клиентов или превышающая их*. В англоязычной технической литературе этот подход известен по аббревиатуре DFN – Design for Network (проектирование сети). Встречается также еще одна аббревиатура – DFE (Design for Excellence). Она определяет проектирование для превосходства, то есть достижения конкурентного преимущества. Различие между двумя подходами (DFN и DFE) может заключаться в несовпадающих сценариях модернизации эксплуатируемой сети электросвязи.

После завершения анализа основных характеристик эксплуатируемых сетей и уточнения поставленных целей разрабатывается несколько сценариев. Все сценарии направлены на достижение поставленных целей. Количество разрабатываемых сценариев выбирается с учетом нескольких факторов, среди которых следует выделить:

- конкретные особенности модернизируемых сетей электросвязи;
- цели, выбранные Оператором или владельцем сети;
- административные, технические и финансовые ограничения на получение лицензий, применение оборудования и использование технологий.

Практика проектирования сетей свидетельствует, что иногда требуется изменение решения, которое было выбрано для практической реализации. Это связано с причинами объективного и субъективного характера. Наличие нескольких сценариев позволяет, при необходимости, оперативно внести коррективы в процесс модернизации эксплуатируемой сети.

Предпоследний этап планирования сети – анализ предлагаемых сценариев с целью разработки системных решений. Системными называют решения, определяющие базовые (ключевые) свойства и функциональные возможности телекоммуникационной сети. К ним обычно относят:

- структуру сети;
- перечень поддерживаемых услуг;
- план нумерации;
- используемые технологии передачи, коммутации и обработки информации;
- принципы организации технической эксплуатации;
- рекомендуемые системы сигнализации;
- правила взаимодействия с другими сетями связи;
- показатели качества обслуживания трафика.

В процессе разработки системных решений некоторые сценарии исключаются из дальнейшей работы. Для остальных сценариев – нижний фрагмент рисунка 1.2 – обычно требуется провести ряд уточнений, касающихся отдельных этапов их реализации. Можно выделить две "петли обратной связи", изображенные пунктирными линиями. Они указывают на тот факт, что могут потребоваться или разработка новых сценариев модернизации эксплуатируемых сетей или пересмотр результатов проведенного анализа. Решения подобного рода принимает Оператор или владелец сети.

Обратимся теперь к рисунку 1.3, который иллюстрирует ряд деталей для каждого сценария модернизации эксплуатируемой сети. Предлагаемый алгоритм включает очень важный этап планирования инфокоммуникационной системы в целом – декомпозицию. Речь идет о выделении общей транспортной и нескольких коммутируемых сетей. Нижняя часть рисунка 1.3 практически повторяет аналогичный фрагмент из предыдущей модели. Поэтому нет смысла рассматривать два нижних блока рисунка 1.3.

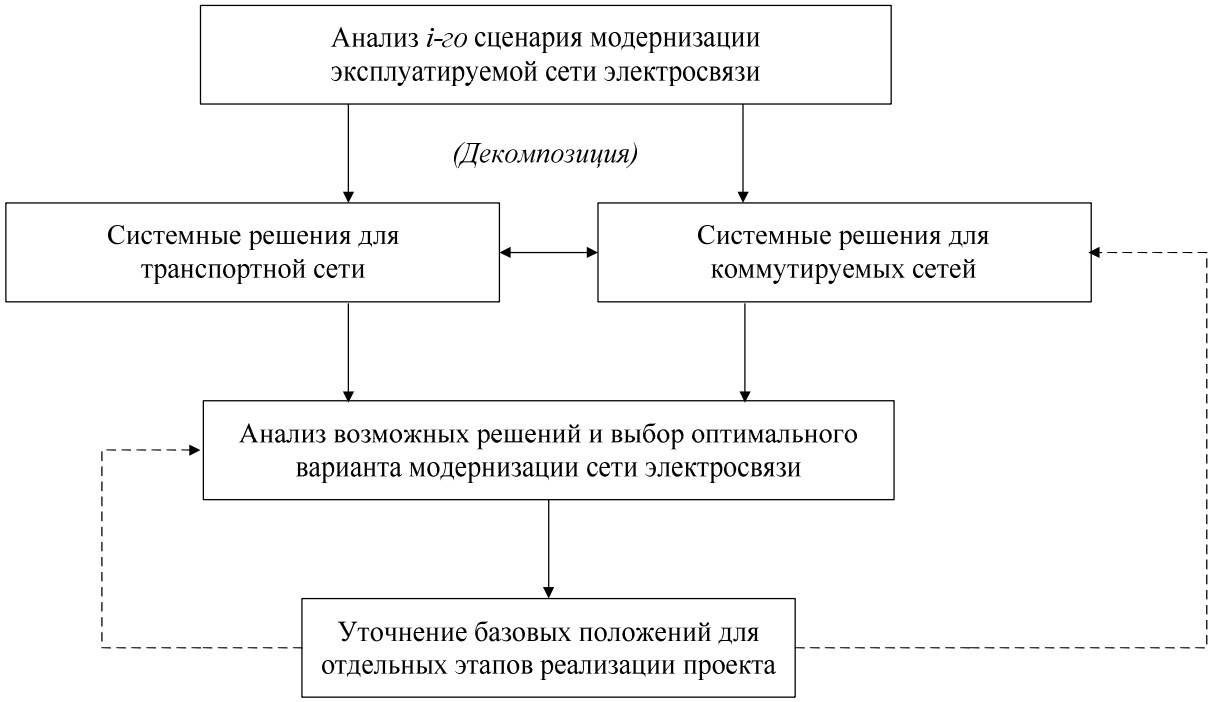


Рисунок 1.3. Сценарии модернизации сети. Общий подход

Декомпозиция упрощает решение задач планирования телекоммуникационной сети. Тем не менее, все последующие операции, касающиеся выбора системных решений для транспортной и коммутируемых сетей, взаимно зависимы. В отечественной технической литературе транспортная сеть ранее называлась первичной, а коммутируемая – вторичной

[2]. Коммутируемых сетей может быть несколько. Их обычно классифицируют по основному виду передаваемой информации (телеграфная, телефонная и другие).

В каждом конкретном случае создается разное количество коммутируемых сетей. На рисунке 1.4 показана модель, иллюстрирующая декомпозицию системы связи на одну транспортную и четыре коммутируемые сети.

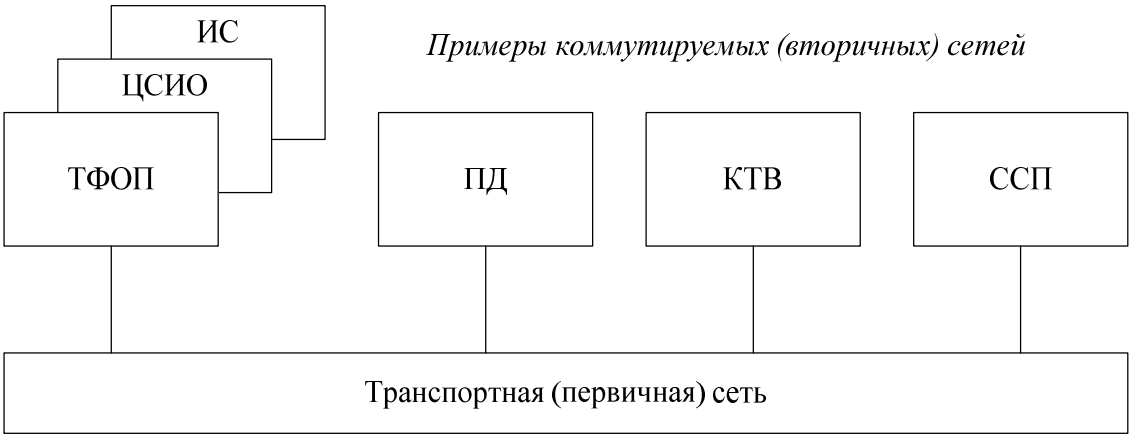


Рисунок 1.4. Декомпозиция системы связи

Первой в левой верхней части модели показана телефонная сеть общего пользования (ТФОП). В монографии именно этой сети будет уделено основное внимание по двум причинам. Во-первых, обслуживание трафика речи пока приносит Оператору основные доходы. В этом несложно убедиться, проанализировав статистику доходов Операторов связи, которую можно найти в отраслевых журналах или на сайтах Internet. Во-вторых, переход к ССП осуществляется в процессе модернизации ТФОП. Эволюция ТФОП, заключающаяся в использовании ряда дополнительных аппаратно-программных средств, позволяет существенно расширить ее функциональные возможности. Примеры развития ТФОП известны по аббревиатурам ЦСИО (цифровая сеть интегрального обслуживания), а также ИС (интеллектуальная сеть). Ни ЦСИО, ни ИС (вопреки их названию) не следует считать самостоятельными сетями. По этой причине на рисунке 1.4 они изображены за блоком "ТФОП".

Транспортные ресурсы могут использоваться для сетей передачи данных (ПД) и кабельного телевидения (КТВ). Формирование ССП может начаться за счет выделения необходимых ресурсов из общей транспортной сети. Этими четырьмя примерами не исчерпываются все практически значимые ситуации. В частности, создаются также сети арендованных каналов, транспортные ресурсы могут использоваться для подключения базовых станций беспроводных телекоммуникационных систем к контроллерам.

Модель инфокоммуникационной системы, представленная на рисунке 1.4, может считаться идеализированной. Ее реализация возможна при совпадении ряда условий, среди которых весьма существенны два момента:

- все Поставщики услуг электросвязи (Service Provider) согласны использовать общие транспортные ресурсы или же весь спектр инфокоммуникационных услуг предоставляется одним Оператором;
- транспортная сеть построена как единая организационно-техническая система на базе современного оборудования.

Очевидно, что капитальные затраты на построение единой транспортной сети – K_C будут, за исключением каких-нибудь гипотетических ситуаций, меньше аналогичной величины для тех вариантов, когда создается несколько (две или более) транспортных сетей – K_S. Здесь индекс "c" используется для затрат и иных величин, которые относятся к случаям применения общих (*common*) ресурсов. Индекс "s" указывает на раздельное (*sep-*

arate) использование ресурсов. Соотношение между двумя величинами капитальных затрат может быть записано в виде следующего неравенства:

$$K_C < K_S. \qquad (1.1)$$

Построение и модернизация сети обычно включает несколько этапов – N и M для двух рассматриваемых возможностей соответственно. Величины капитальных затрат можно представить в виде двух следующих сумм:

$$K_C = K_{C1} + K_{C2} + ... + K_{CN}, \quad K_S = K_{S1} + K_{S2} + K_{SM}. \qquad (1.2)$$

Вполне возможно, что на первом и даже последующих этапах капитальные затраты на развитие нескольких транспортных сетей будут меньше, чем эта же величина, рассчитанная для сценария, предусматривающего построение единой системы. То есть, неравенства типа $K_{C1} > K_{S1}$ и $K_{C2} > K_{S2}$ будут справедливы. Эти простые и очевидные рассуждения иллюстрируют одну из возможных причин отказа от построения единой транспортной сети – отсутствие финансовых средств на начальном этапе модернизации инфокоммуникационной системы. Другая причина обусловлена соображениями, которые касаются возможности продажи коммутируемой сети. Шансы такой операции возрастают при наличии транспортных ресурсов, полностью принадлежащих коммутируемой сети.

Создание нескольких транспортных сетей может стать следствием той ситуации, которая свойственна современному этапу развития инфокоммуникационного рынка. На рисунке 1.5 показан пример функционирования трех видов транспортных сетей, которые построены разными Операторами. Для каждой коммутируемой сети в скобках указана основная услуга, для которой создавалась сеть.

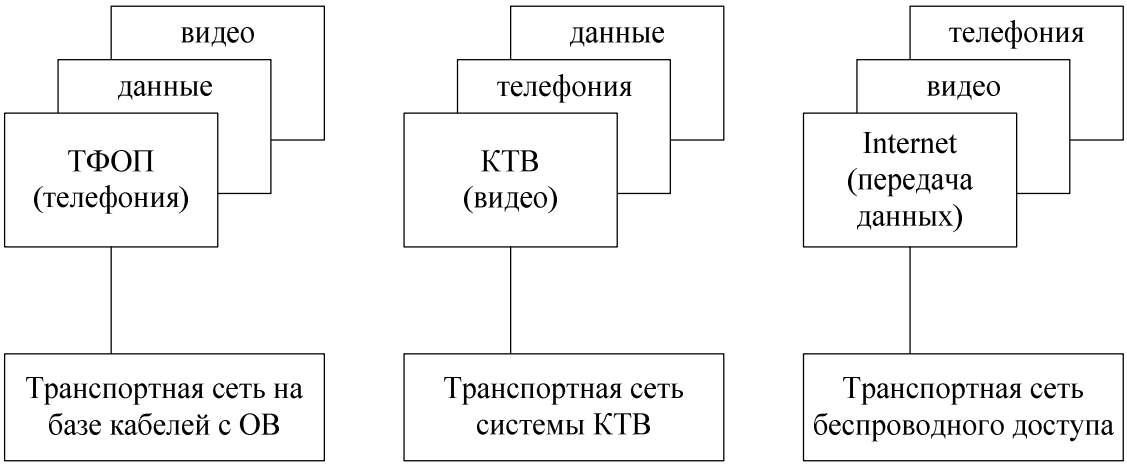


Рисунок 1.5. Три вида транспортных сетей

Выбор трех самостоятельных транспортных сетей не случаен. Операторы строили собственные транспортные сети, применяя различные виды линейных сооружений и каналообразующего оборудования. Структуры эксплуатируемых транспортных сетей, как правило, также не одинаковы. Определенная унификация транспортных сетей возможна на некоторых участках при использовании кабелей с оптическими волокнами (ОВ). Унификация такого рода вряд ли целесообразна для сетей беспроводного доступа [3, 4].

Конкуренция (особенно – на уровне сети доступа) разворачивается между тремя Операторами, которые в начале своей деятельности сделали основной акцент на телефонную связь, кабельное телевидение и беспроводный Internet. Все Операторы, имеющие транспортные сети, стремятся к расширению перечня предоставляемых услуг. В двух верхних блоках для каждого Оператора указаны новые виды обслуживания, которые могут быть предоставлены клиентам. Модернизация технических средств, используемых всеми тремя Операторами, может привести к тому, что каждый из них будет способен поддерживать все виды услуг электросвязи. На английском языке такому перечню услуг

соответствует термин *"triple-play service"* [5]. Если конкуренция не приведет к изменению числа Операторов, то в перспективе рассматриваемая модель трансформируется в ту, что показана на рисунке 1.4, но с одной весьма существенной особенностью. Она заключается в том, что в границах одной и той же территории будут созданы три сети, решающие идентичные задачи, используя разные технические средства.

В монографии основное внимание уделяется тому направлению развития системы электросвязи, которое основано на эволюции ТФОП. Это означает, что подробно задачи планирования телекоммуникационных сетей, которые построены на базе систем КТВ и беспроводного широкополосного доступа (БШД), не рассматриваются. Коль скоро здесь упомянуто слово "широкополосный", необходимо пояснить его смысл. К сожалению, пока общепринятого определения не существует. Ранее специалисты говорили о трех видах доступа: узкополосный (narrowband) – до 128 кбит/с, широкополосный (wideband) – от 128 до 2048 кбит/с и сверхширокополосный (broadband) – более 2048 кбит/с. Потом слово "wideband" ушло из лексикона связистов, а термин "broadband" стал переводиться как *широкополосный*. Чаще под ним понимается доступ со скоростью более 2048 кбит/с.

Вернемся к рисунку 1.2, выделив блок под названием "Анализ перспективных требований к инфокоммуникационной системе". На рисунке 1.6 приведены три кривые, иллюстрирующие вероятные изменения тех требований, которые наиболее существенны для инфокоммуникационной системы. Все функции отражают качественный характер рассматриваемых процессов.

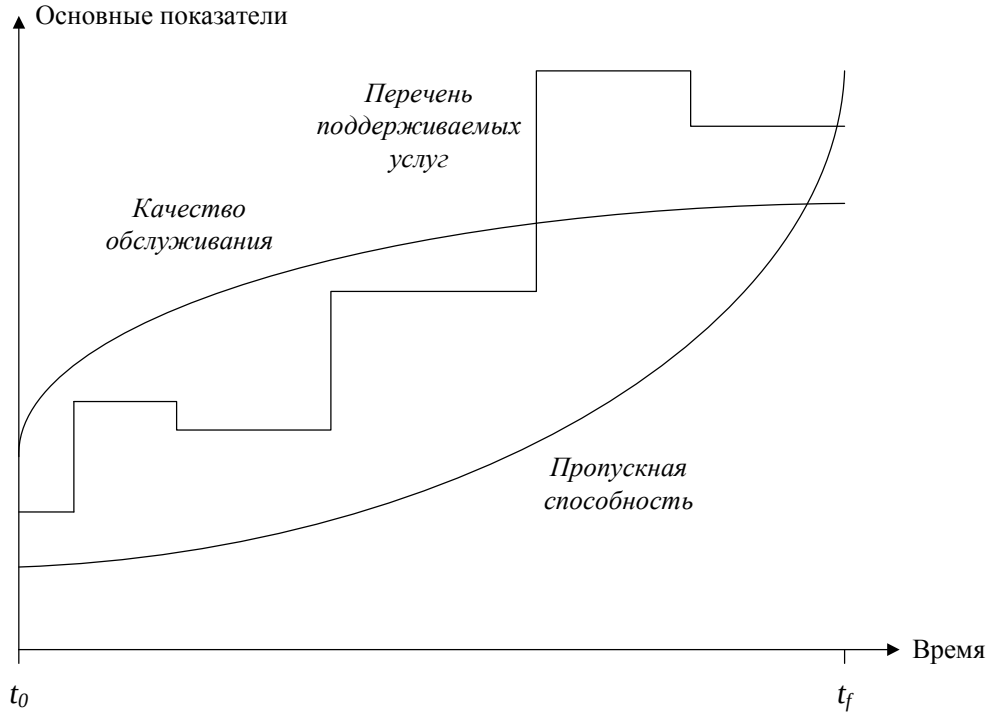


Рисунок 1.6. Постановка задачи: основные показатели работы сети

Рассмотрим кривые "Пропускная способность", "Перечень поддерживаемых услуг" и "Качество обслуживания" на отрезке времени $[t_0, t_f]$. Точка t_0 соответствует началу того момента времени, когда принято решение о модернизации эксплуатируемой сети. Точка t_f определяет момент времени, когда соответствующий проект полностью реализован. Индекс "f" – первая буква в словах *"finish"* (завершение) и *"future"* (будущее) – будет и далее использоваться для указания на окончание какого-либо этапа или процесса.

Пропускная способность сетей в ближайшие годы будет расти весьма существенно, что объясняется рядом причин, изложенных, например, в [4]. Кривая, приведенная на ри-

сунке 1.6, отражает качественные аспекты этого процесса. Численные оценки роста пропускной способности приведены во второй и в третьей главах монографии.

Перечень услуг, которые будет поддерживать перспективная телекоммуникационная сеть, отображается ступенчатой функций. Ее характер объясняется появлением новых услуг на фоне отказа от устаревших видов обслуживания. Следует подчеркнуть, что характер рассматриваемой функции не будет идентичным для разных уровней иерархии сети. В частности, интеграционные процессы наиболее активно реализуются в сети доступа.

Очевидно, что станут более жесткими требования к качеству обслуживания (*quality of service – QoS*). Этот термин определен в рекомендации Е.800 [6], которая разработана Международным союзом электросвязи (МСЭ). В текущей версии рекомендации Е.800 дано определение QoS, которое можно перевести так: *совокупность характеристик обслуживания, которые связаны с ее возможностью удовлетворять установленные и предполагаемые потребности пользователя*.

Это значит, что речь идет о совокупности показателей, связанных с вероятностью отказа в обслуживании, временем ожидания на каких-либо этапах обработки вызова, величиной ошибок, возникающих в процессе обмена информацией, и другими атрибутами услуг. Аналогичный подход используется также в материалах МЭК (Международной электротехнической комиссии) и ETSI (Европейского института телекоммуникационных стандартов).

На рисунке 1.7 показан пример модернизации городской телефонной сети (ГТС), которая образована тремя районными автоматическими телефонными станциями (РАТС). Все три РАТС, изображенные в левой части модели, связаны между собой по принципу "каждая с каждой". Такой способ связи аналоговых РАТС был характерен для ГТС с емкостью до 80000 номеров [7]. В нижней части рисунка отмечена территория новой застройки, в пределах которой еще не установлено ни одного телефонного аппарата (ТА). Пунктирными линиями показаны границы пристанционных участков.

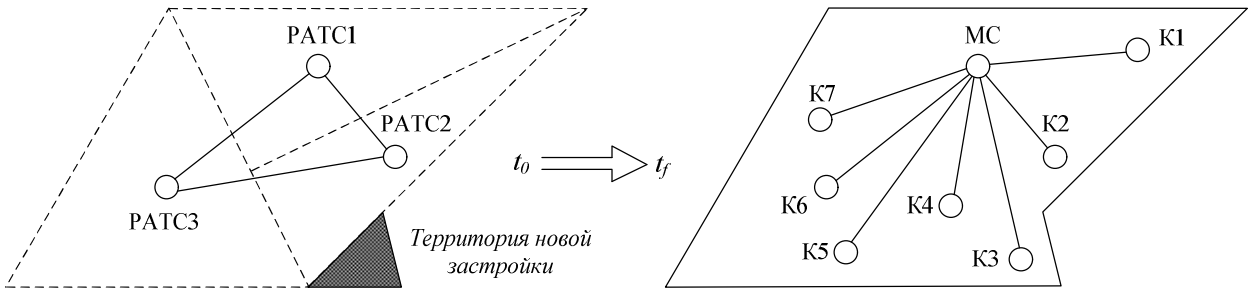


Рисунок 1.7. Пример модернизации городской телефонной сети

Для сети заданы начальный – t_0 и конечный – t_f этапы модернизации. Допустим, что известны все основные требования, которым должна отвечать ГТС к моменту времени t_f. Речь идет как о качественных тенденциях, так и о соответствующих количественных оценках. Тогда можно найти оптимальную структуру сети. Ее модель показана в правой части рисунка 1.7. Предположим, что оптимальное решение состоит в установке одной *местной станции* (МС) большой емкости, в которую включаются семь *концентраторов* (К). Основная задача планирования состоит в разработке возможных сценариев поэтапного перехода к оптимальной структуре сети, которая подразумевает объединение трех пристанционных участков в один. Применение коммутационных станций большой емкости – важнейшая тенденция развития ТФОП [4].

С методологической точки зрения подобный вариант модернизации ГТС может рассматриваться как системный. Альтернативой для Оператора будет подход, основанный на решении сиюминутных задач. В этом случае структура ГТС к моменту времени t_f также будет сформирована как результат проведения Оператором ряда мероприятий, каждое из которых направлено на решение некой совокупности частных задач.

Теперь можно перейти к классификации задач, которые должны решаться в процессе планирования сети. Эти задачи удобно разделить на три большие группы:

- прогнозирование основных показателей;
- разработка модели, ее расчет и интерпретация результатов;
- технико-экономический анализ.

Предложенное разделение задач показано на рисунке 1.8. Смежные блоки на этом рисунке соединены сплошными линиями, чтобы подчеркнуть важные связи между соответствующими группами задач. Крайние блоки связаны пунктирной линией, что свидетельствует о косвенном влиянии этих групп задач друг на друга.

Рисунок 1.8. Три группы задач планирования телекоммуникационной сети

Блок "Прогнозирование основных показателей" включает в себя ряд задач. Часть из них была представлена на рисунке 1.6. Методы прогнозирования обычно делят на три класса [8, 9]:

- *статистические;*
- *причинно-следственные;*
- *комбинированные.*

Все три класса методов прогнозирования используются для решения задач, которые возникают при планировании телекоммуникационных сетей.

Статистические методы позволяют получить прогностические оценки, основываясь на истории изменения исследуемой величины. Допустим, что нас интересует функция $F(t)$, которая содержит данные о количестве абонентов местной телефонной сети на отрезке времени $[t_r, t_0]$. Точка t_r определяет тот момент времени, когда начался сбор необходимых статистических данных. Подобные величины служат точками отсчета (*reference*). В монографии соответствующие величины будут снабжаться индексом "r". В выбранном примере идеальное значение точки t_r – дата начала обслуживания первого абонента. Поведение функции $F(t)$ на отрезке времени $[t_r, t_0]$ позволяет прогнозировать развитие изучаемого процесса на перспективу – для периода $[t_0, t_f]$. При использовании статистических методов прогнозирования дополнительная информация, касающаяся сути происходящих процессов, не учитывается.

Причинно-следственные методы прогнозирования ориентированы на объяснение будущего исследуемой системы, оперируя информацией о ее прошлом и настоящем. Эти методы весьма эффективны для прогнозирования поведения сложных систем, которые в процессе своего развития претерпевают существенные качественные изменения. Именно такая ситуация характерна для современной инфокоммуникационной системы и многих ее элементов. Данный факт объясняет ориентацию на причинно-следственные методы при решении задач прогнозирования во второй и в третьей главах монографии.

Если есть возможность использовать и статистические, и причинно-следственные методы одновременно, то, как правило, разрабатываются самые достоверные прогнозы. Такие методы прогнозирования называются комбинированными. Они также используются в практике планирования телекоммуникационных сетей.

Классификация основных задач прогнозирования приведена на рисунке 1.9. Все задачи разделены на три взаимосвязанных направления. Это деление весьма условно по двум причинам. Во-первых, оно отражает субъективное мнение автора. Во-вторых, предложенная классификация используется исключительно для логичного изложения вопросов, существенных для последующих разделов монографии. Например, в некоторых публикациях вводится понятие "среднесрочный прогноз". В монографии подобные виды прогноза, как правило, используются. Именно по этой причине в нижней части рисунка 1.9 выделено только два блока: *"краткосрочный прогноз"* и *"долгосрочный прогноз"*.

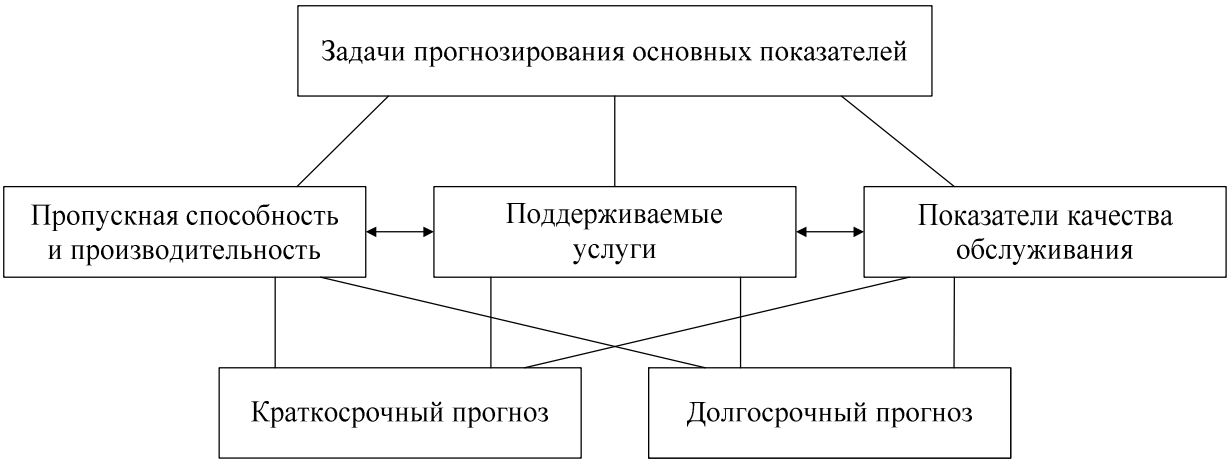


Рисунок 1.9. Классификация задач, связанных с прогнозированием

Оценки пропускной способности транспортной сети и производительности средств коммутации очень важны для оптимального выбора проектных решений. Исходные данные для таких оценок могут быть получены только на основе прогнозов трафика, порождаемого коммутируемыми сетями. Этот трафик, в свою очередь, может быть рассчитан, если известны прогнозы, связанные с перечнем поддерживаемых услуг. При расчете пропускной способности важную роль играют показатели качества обслуживания, которым должна отвечать перспективная телекоммуникационная сеть. Кроме того, некоторые пользователи инфокоммуникационной системы заинтересованы в повышении надежности связи. Выполнение подобных требований часто приводит к резервированию основных элементов телекоммуникационной сети, что заметно влияет на ее структуру, пропускную способность и производительность.

Для пропускной способности и производительности сети, перечня поддерживаемых услуг и показателей качества обслуживания интересны два вида оценок. Во-первых, Оператор должен знать краткосрочный прогноз, то есть то, что его ожидает в ближайшие годы (обычно – в период от трех до пяти лет). Во-вторых, для проведения разумной технической политики Оператору целесообразно разработать долгосрочный прогноз, охватывающий период в десять лет и более. Часто длительность этого периода равна сроку службы (*lifetime*) устанавливаемого оборудования или же используемой технологии.

Перейдем к задачам, названным на рисунке 1.8 "Разработка модели – расчет – интерпретация результатов". Предлагаемая классификация задач, входящих в этот цикл, показана на рисунке 1.10, который включает затемненный эллипс. Место размещения этого эллипса указывает на несколько задач, перечисленных на следующем рисунке. Разработка такой модели, которая позволяет исследовать телекоммуникационную сеть математическими методами, – очень важный момент в составе рассматриваемых задач. Основным проблемам, возникающим при выборе адекватной математической модели, посвящен раздел 1.2.

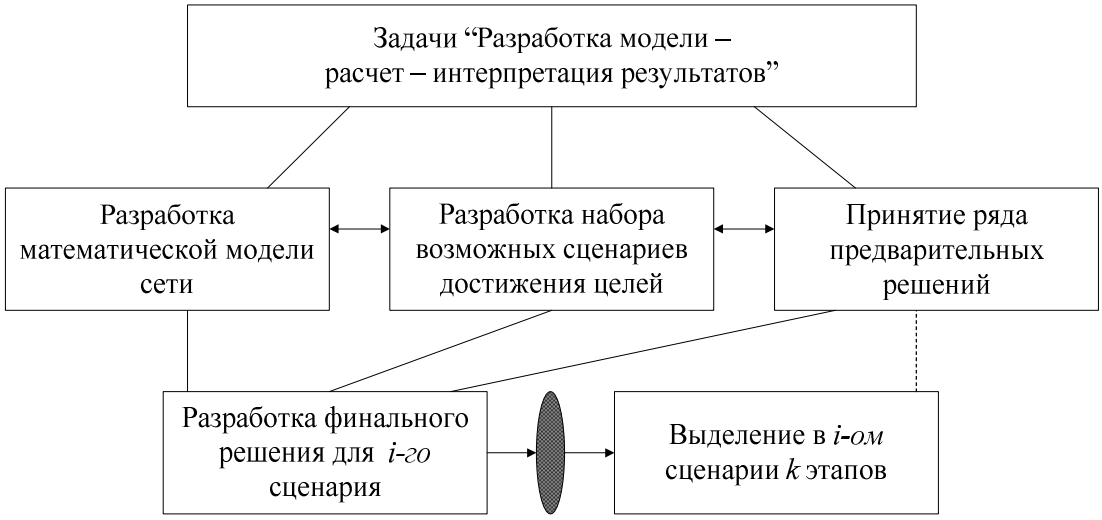


Рисунок 1.10. Классификация задач, входящих в цикл "Разработка модели – расчет – интерпретация" (основная иллюстрация)

Когда выбрана модель, адекватно представляющая телекоммуникационную сеть, можно приступить к этапу "расчет". На этом этапе разрабатывается набор сценариев, каждый из которых может быть положен в основу реального проекта, связанного с модернизацией сети. В процессе разработки этих сценариев необходимо принять ряд предварительных решений, позволяющих конкретизировать дальнейшие операции по планированию сети. Эти решения могут приниматься Проектировщиком или Оператором.

Допустим, что в результате выполнения перечисленных выше операций осталось L сценариев, которые могут найти практическое применение. Тогда для каждого $i-го$ сценария ($i = 1, 2, \ldots, L$) необходимо разработать финальные решения. Это означает, что определяется структура и основные технические характеристики телекоммуникационной сети, которая будет создана в результате реализации $i-го$ сценария.

В пределах каждого $i-го$ сценария выделяется k этапов. Этому шагу предшествует ряд операций, показанных на рисунке 1.11. В процессе их выполнения решается ряд очень сложных задач.

Рисунок 1.11. Классификация задач, входящих в цикл "Разработка модели – расчет – интерпретация" (дополнение)

Разработка решения, названного финальным, начинается с декомпозиции сети на два основных компонента. Первый компонент – единая транспортная сеть. Второй компонент представляет собой совокупность коммутируемых сетей. Для сетей обоих видов должны быть определены оптимальные структуры. Подобные задачи, с некоторыми упрощениями, можно трактовать следующим образом:

а) установлен ряд показателей $(p_0, q_0, r_0, ...)$, которые должны обеспечиваться сетью при ее построении на основе любого сценария;

б) для каждого $i-го$ сценария ($i = 1, 2, ..., N$) может быть исследована стоимостная функция $C_i = F(t, p_i, q_i, r_i, ...)$, определяющая соответствующую величину капитальных, приведенных или иных затрат в момент времени t;

в) для практической реализации, с учетом выбранного критерия минимизации функции $C_i = F(t, p_i, q_i, r_i, ...)$, из всех возможных решений выбирается один сценарий, считающийся наилучшим.

Такая трактовка свойственна большинству оптимизационных задач [10, 11]. В этих и в других монографиях можно найти методы решения многих задач, но здесь существенны те, которые учитывают фактор времени. Обратимся к рисунку 1.12, чтобы объяснить влияние этого фактора.

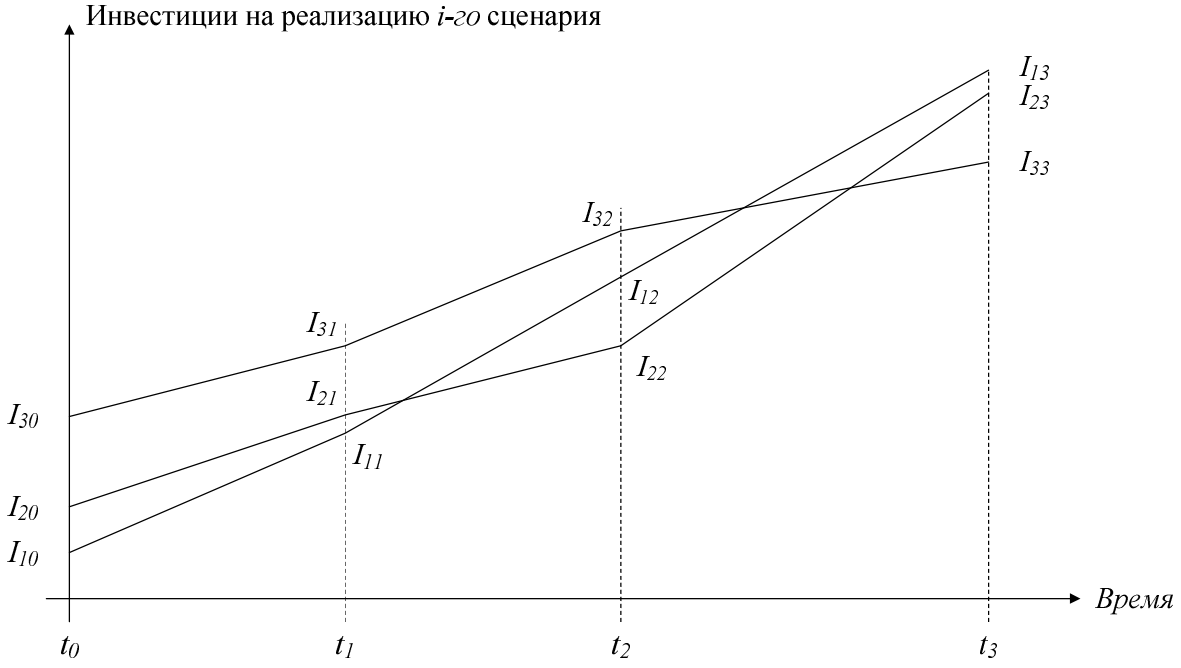


Рисунок 1.12. Затраты на телекоммуникационную сеть, создаваемую в три этапа

На рисунке 1.12 показаны три функции, описывающие величины инвестиций – I_{ij}, которые необходимы для реализации трех сценариев модернизации гипотетической сети ($i = 1, 2, 3$). Предположим, что планируется три этапа модернизации сети ($j = 1, 2, 3$).

Выбор оптимального сценария не следует считать тривиальной задачей. На первом этапе, длительность которого определяется отрезком $[t_0, t_1]$, для начальных инвестиций справедливо такое неравенство: $I_{10} < I_{20} < I_{30}$. По завершению первого этапа соотношение между необходимыми инвестициями сохранится – $I_{11} < I_{21} < I_{31}$. Учитывая, что точность оценки последующих инвестиций снижается, Оператор может остановиться на первом сценарии. Более того, он иногда вынужден выбирать первый сценарий из-за ограничений на возможный объем начальных инвестиций.

К моменту завершения второго этапа минимальные суммарные инвестиции присущи второму сценарию. Третий сценарий требует максимальных затрат на свою реализацию. В

конце последнего этапа модернизации телекоммуникационной сети справедливо такое неравенство: $I_{13} > I_{23} > I_{33}$. Это означает, что по суммарному объему всех необходимых инвестиций предпочтителен третий сценарий. Самым неудачным становится первый сценарий, выглядевший привлекательным на отрезке $[t_0, t_1]$. Если упростить ситуацию, то можно сформулировать такие рекомендации:

- при наличии финансовых возможностей целесообразно ориентироваться на третий сценарий модернизации телекоммуникационной сети;
- в противном случае для практической реализации рекомендуется выбрать второй или первый сценарии.

Большинство современных экономико-математических методов позволяет детально проанализировать все возможные сценарии [12, 13], помогая Оператору выбрать разумные решения. Эти аспекты планирования телекоммуникационных сетей рассматриваются во второй и в третьей главах монографии.

Вернемся к рисунку 1.11, чтобы завершить рассмотрение изображенных на нем блоков. Прежде всего, отметим следующий момент: декомпозиция, которая подразумевает выделение единой транспортной и совокупности коммутируемых сетей, не означает, что эти два компонента будут далее рассматриваться независимо.

Выбор оптимальных структур для транспортной и коммутируемых сетей всегда осуществляется после решения совокупности задач. На рисунке 1.11 для каждой ветви предлагаемой классификации эти задачи разбиты на два блока. Один блок, названный "*Решение других математических задач*", рассматривается как общий для транспортной и коммутируемых сетей. Он акцентирует внимание на тех вопросах, которые можно считать вспомогательными по отношению к основной задаче. Основная задача для большинства коммутируемых сетей – определение мест размещения устройств коммутации, которые иногда называются системами распределения информации. Решению подобных задач для ТФОП посвящен ряд фундаментальных работ [14 – 17]. Основная задача для современной транспортной сети заключается в выделении совокупности колец, обычно образующих иерархическую структуру [4]. Решение перечисленных задач следует рассматривать как взаимосвязанный процесс.

Когда задачи, рассмотренные выше, уже решены, в каждом сценарии необходимо выделить k этапов. Для каждого сценария $i-ый$ этап $(i = \overline{1, k})$ определяет конкретный объем работ в общем процессе модернизации телекоммуникационной сети. Этот объем работ может быть оценен при помощи совокупности технико-экономических показателей.

Слова "технико-экономические показатели" в последней фразе предыдущего абзаца позволяют перекинуть логический мостик к третьей (последней) группе задач, решаемых в процессе планирования телекоммуникационной сети. Соответствующая классификация приведена на рисунке 1.13, на котором показаны три взаимосвязанных блока.

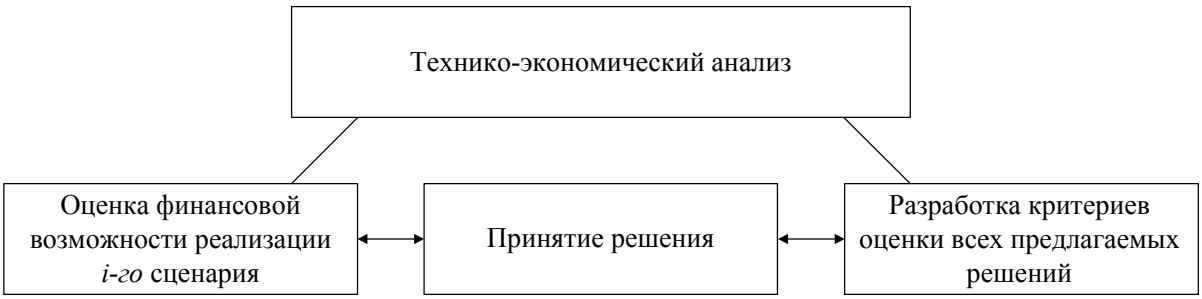


Рисунок 1.13. Классификация задач, относящихся к технико-экономическому анализу

Во-первых, необходимо оценить финансовые возможности реализации каждого из сценариев модернизации сети (левый блок на рисунке 1.13). Очень эффективные сетевые решения могут оказаться чисто теоретическими схемами из-за ограничений, касающихся финансовых возможностей Оператора. Предлагаемые решения, как правило, имеют и до-

стоинства, и недостатки. Все плюсы и минусы необходимо тщательно оценить как с технической, так и с экономической точек зрения. Такой подход основан на разработке критериев для всесторонней оценки предлагаемых решений (правый блок на рисунке 1.13).

Центральный блок (и на рисунке 1.13, и вообще) – принятие решения. Несомненно, что это наиболее ответственный шаг в планировании телекоммуникационной сети. Выбор окончательного варианта осуществляется Оператором или владельцем сети после анализа всех возможных альтернатив, проработанных в процессе планирования.

Для завершения раздела 1.1 (вспомним первый рисунок) осталось перечислить те задачи планирования сети, которые, по каким-либо причинам, не рассматриваются в этой монографии. Классификацию задач подобного рода, приведенную на рисунке 1.14, нельзя считать полной. На самом деле в монографии не упоминается множество задач, прямо или косвенно связанных с телекоммуникационными сетями. Тем не менее, предлагаемая классификация позволяет выделить характерные проблемы, на которые необходимо обратить внимание специалистов, занимающихся исследованием, проектированием, созданием и технической эксплуатацией телекоммуникационных сетей.

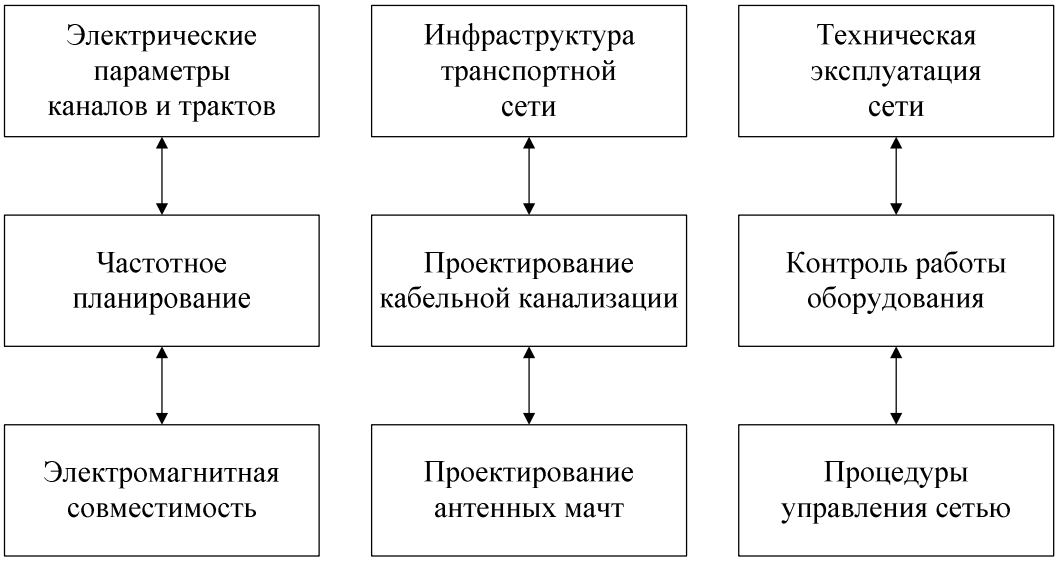


Рисунок 1.14. Примеры задач планирования сети,
которые *не рассматриваются* в монографии

Первая группа задач включает расчеты электрических параметров каналов и трактов. Среди этих задач можно выделить два направления модернизации сетей, весьма важных с практической точки зрения. Во-первых, применение оборудования, которое основано на различных беспроводных (*wireless*) технологиях, порождает проблемы с распределением спектра используемых частот. Во-вторых, возрастающие требования к качеству передачи информации, с одной стороны, и активное освоение спектра частот, с другой стороны, очень остро ставят вопросы электромагнитной совместимости. Мне не приходилось заниматься подобными задачами. Единственное, что я могу сделать – назвать несколько работ, в которых читатель найдет ответы на эти, несомненно, важные вопросы. По всей видимости, целесообразно сослаться на публикации [18, 19, 20].

Вторая группа задач названа на рисунке 1.14 "Инфраструктурой транспортной сети". В монографии это выражение указывает на кабельную канализацию, антенные мачты и гражданские сооружения, используемые в телекоммуникационных сетях. Проектирование этих элементов – важная часть в деле создания и дальнейшего развития сети. В работах [21, 22, 23] можно найти необходимую информацию, касающуюся инфраструктуры сети и соответствующих методов расчета.

Третья (а по важности – одна из самых главных) группа задач связана с технической эксплуатацией комплекса оборудования, используемого для построения сети. На рисунке 1.14 выделено, для примера, только два направления – контроль работы оборудования и

процедуры управления сетью связи. В принципе, можно назвать множество аспектов технической эксплуатации, которые целесообразно учитывать в процессе планирования телекоммуникационных сетей. Публикации [24, 25, 26] помогут читателю ознакомиться с актуальными проблемами технической эксплуатации.

Следует еще раз подчеркнуть, что приведенные в этом разделе соображения не претендуют на фундаментальную классификацию всех задач, возникающих в процессе планирования телекоммуникационных сетей. Основная цель раздела 1.1 – подготовить базу для изложения вопросов, составляющих основу второй и третьей глав монографии. Кроме того, раздел 1.1 служит своего рода введением для последующей части первой главы, которая начинается с разработки моделей телекоммуникационной сети.

Simplex sigillum ver.
(Простота – признак истины)

1.2. Математические модели телекоммуникационных сетей

1.2.1. Два основных типа моделей

Телекоммуникационную сеть целесообразно рассматривать как сложную систему. Выражение "сложная система" часто встречается в технической литературе. Удачное определение этого термина приведено, например, в Большом энциклопедическом словаре [27]: *"Сложная система – составной объект, части которого можно рассматривать как отдельные системы, объединенные в единое целое в соответствии с определенными правилами и принципами или связанные между собой заданными отношениями"*.

В монографии по теории сложных систем, написанной Н.П. Бусленко [28], в качестве характерного примера рассматривается телефонная сеть. Кстати, в упомянутой работе Н.П. Бусленко также дается весьма удачное определение сложной системы. Она представляется как *многоуровневая конструкция из взаимодействующих элементов, объединяемых в подсистемы разных уровней*. Интересен подход, использованный авторами работы [29] в главе "Основные понятия теории моделирования систем":

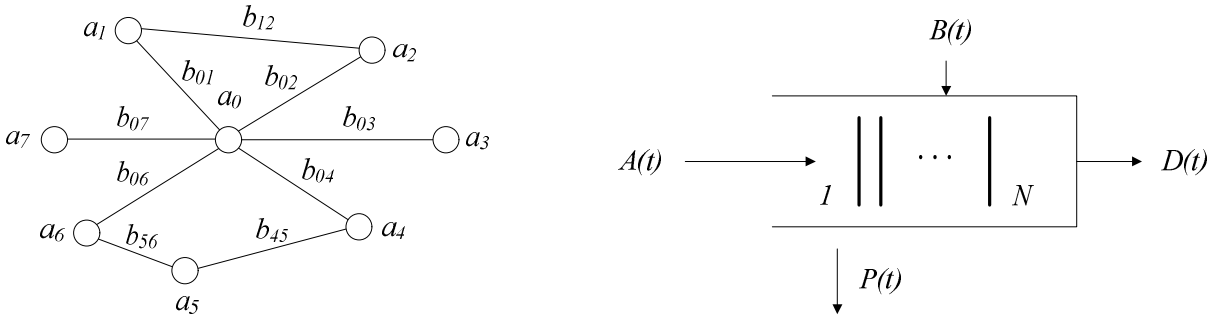
- система S – целенаправленное множество взаимосвязанных элементов любой природы;
- внешняя среда E – множество существующих вне системы элементов любой природы, оказывающих влияние на систему или находящихся под ее воздействием.

При исследовании сложных систем основное внимание обычно уделяется двум направлениям:

- задачи анализа, связанные с изучением свойств и поведения системы в зависимости от ее структуры и значения параметров;
- задачи синтеза, сводящиеся к выбору структуры и значений параметров, исходя из заданных свойств системы.

Для решения этих задач, прежде всего, необходимо разработать математические модели телекоммуникационных сетей. Эти модели делятся на два основных вида. Модель первого вида – граф. Он удобен для решения задач, касающихся структуры сети. Второй вид модели – система массового обслуживания (СМО). Эти модели используются для решения задач, связанных с качеством обслуживания в телекоммуникационных сетях.

На рисунке 1.15 приведены примеры моделей обоих видов. В левой части рисунка показан граф, содержащий восемь вершин и девять ребер. В правой части иллюстрации изображена СМО, служащая моделью одного из элементов сети. Обычно между моделями обоих видов невозможно установить какое-либо соответствие, так как они отражают различные аспекты построения и функционирования телекоммуникационных сетей или ее компонентов.



а) Модель фрагмента сети в виде графа

б) Модель элемента сети в виде СМО

Рисунок 1.15. Два вида моделей для исследования телекоммуникационных сетей

Представим фрагмент телекоммуникационной сети в виде графа [30, 31], который состоит из множества вершин $\{a_i\}$ и множества ребер $\{b_{ij}\}$. Число вершин графа – n может определять, например, количество узлов коммутации в сети. Место расположения вершины графа – a_i позволяет указать координаты той точки, в которой размещается оборудование коммутации. Длина ребра графа – b_{ij} обычно определяет протяженность линии связи, ее пропускную способность или стоимость. Граф считается удобной моделью для исследования структурных характеристик телекоммуникационной сети.

Применение оборудования, которое основано на технологии "коммутация пакетов", приводит к задержкам процессов обмена информацией. Для исследования влияния задержек пакетов на качество обслуживания трафика удобно использовать модели в виде СМО. Примерами исследуемых характеристик можно считать функции распределения (ФР) исследуемых случайных величин. Из этих функций в правой части рисунка 1.15 показаны:

- ФР интервалов времени между заявками, поступающими в СМО – $A(t)$;
- ФР времени обслуживания заявок – $B(t)$;
- ФР интервалов времени между потерянными заявками – $P(t)$;
- ФР интервалов времени между заявками, покидающими СМО – $D(t)$.

Кроме четырех ФР практический интерес представляет величина N – количество мест для ожидания в очереди, а также дисциплина обслуживания заявок.

В следующем параграфе рассматривается ряд положений теории графов. Изложены преимущественно аспекты, представляющие интерес с точки зрения вопросов, которым посвящена монография. В последнем параграфе приведена классификация СМО. В нем акцентируется внимание на тех видах СМО, которые позволяют формализовать процессы работы телекоммуникационных сетей, основанных на технологии "коммутация пакетов". Если Вы хорошо знакомы с основами теорий графов и массового обслуживания, то сразу переходите к разделу 1.3.

1.2.2. Общие сведения о графах

Представление сети связи в виде графа обычно используется для исследования ее структурных характеристик [32]. Граф $G\{A, B\}$, показанный в левой части рисунка 1.15, состоит из восьми вершин и девяти ребер. Этот граф называется неориентированным, так как начало и конец каждого ребра не маркированы. Неориентированный граф хорошо иллюстрирует возможность использования линий связи при дуплексной передаче информации и организации двусторонних соединений. В ориентированном графе каждое ребро имеет стрелку, которая указывает направление либо передачи информации, либо установления соединения. Смешанные графы содержат ребра обоих типов [30, 31].

Если ребро начинается и заканчивается в одной и той же вершине, то оно образует петлю. Обычно в теории сетей связи используются графы без петель [32]. В некоторых

моделях петля оказывается полезным средством. В частности, если вершина графа обозначает концентратор или же учрежденческую автоматическую телефонную станцию (УАТС), то наличие петли позволяет подчеркнуть факт замыкания внутреннего трафика [33, 34].

Ранг вершины $R(a_i)$ – число инцидентных ей ребер. Для модели, показанной в левой части рисунка 1.15, $R(a_0)=6$, а $R(a_7)=1$. Две вершины, соединенные ребром, называются смежными вне зависимости от расстояния между ними. Путь μ_{ij} между двумя вершинами с номерами i и j – это упорядоченный набор ребер, который начинается в a_i и заканчивается в a_j. В любом пути ни одна вершина не должна встречаться дважды. Между каждой парой вершин может существовать несколько путей. Если эти пути содержат непересекающиеся множества вершин и ребер, то их называют независимыми. Путь, который выбран для передачи информации, именуется маршрутом. Процесс выбора такого пути известен по термину "маршрутизация". Ранг пути $R(\mu_{ij})$ – число ребер между вершинами a_i и a_j. Эта величина не может быть меньше единицы, исключая ситуации, когда некоторые вершины графа изолированы [31].

На рисунке 1.16 показан пример графа, служащего моделью для сети доступа. Рассматривается модель сети доступа, которая создается Операторами ТФОП. Тем не менее, созданные транспортные ресурсы могут использоваться и в интересах других коммутируемых сетей.

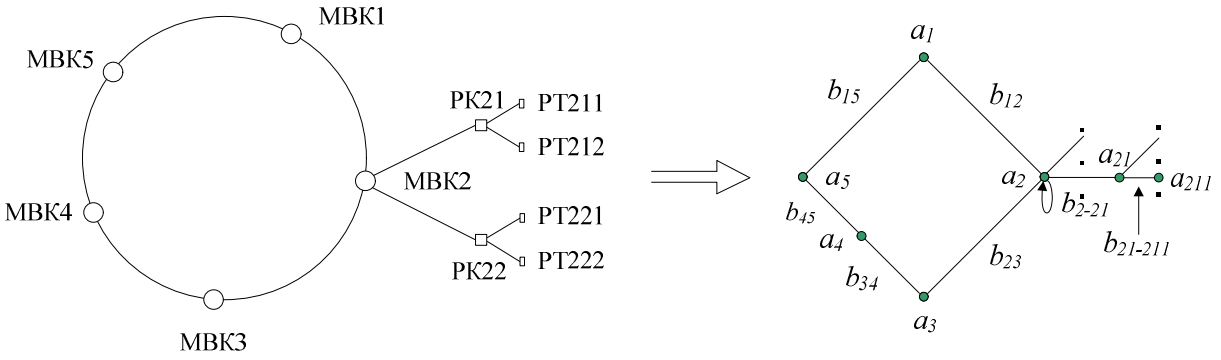


Рисунок 1.16. Пример графа как модели сети доступа

Левый фрагмент рисунка 1.16 иллюстрирует кольцо, которое образовано пятью мультиплексорами ввода/вывода каналов (МВК), объединяемыми, например, кабелем с ОВ. Телефонные аппараты включаются через распределительную коробку (РК). Между РК и МВК, который устанавливается для обеспечения транспортными ресурсами УАТС или концентратора, используются двухпроводные физические цепи.

Между любой парой вершин a_i и a_j при условии, что $i \neq j$, существуют два независимых пути передачи информации. Такая возможность обеспечивается кольцевой топологией. В правой части рисунка 1.16 показаны два пути обмена информацией между вершинами a_2 и a_5. Они проходят через разное количество вершин графа. Следовательно, и количество ребер между вершинами a_2 и a_5 для обоих путей также будет разным.

Применение концентратора или УАТС в сети телефонной связи объясняет наличие петли при вершине a_2. Между МВК и РК прокладывается распределительный кабель, который обычно не резервируется. По этой причине между вершинами a_2 и a_{21} показано одно ребро – b_{2-21}. Индекс "2-21", содержащий разное число цифр, указывает на то, что ребро проложено между разными уровнями иерархии. Аналогично, для участка между РК21 и телефонной розеткой (РТ), в которую включается терминал первого пользователя

(вершины графа a_{21} и a_{211}) показано ребро b_{21-211}. Фрагмент графа между вершинами a_2 и a_{211} служит типичным примером древовидной топологии [30].

При разработке моделей телекоммуникационных сетей могут оказаться полезными и другие графы. В частности, широко используются графы с такими структурами:

- полносвязная;
- звездообразная;
- сотовая;
- решетчатая.

Примеры графов, основанных на перечисленных выше структурах, приведены на рисунке 1.17.

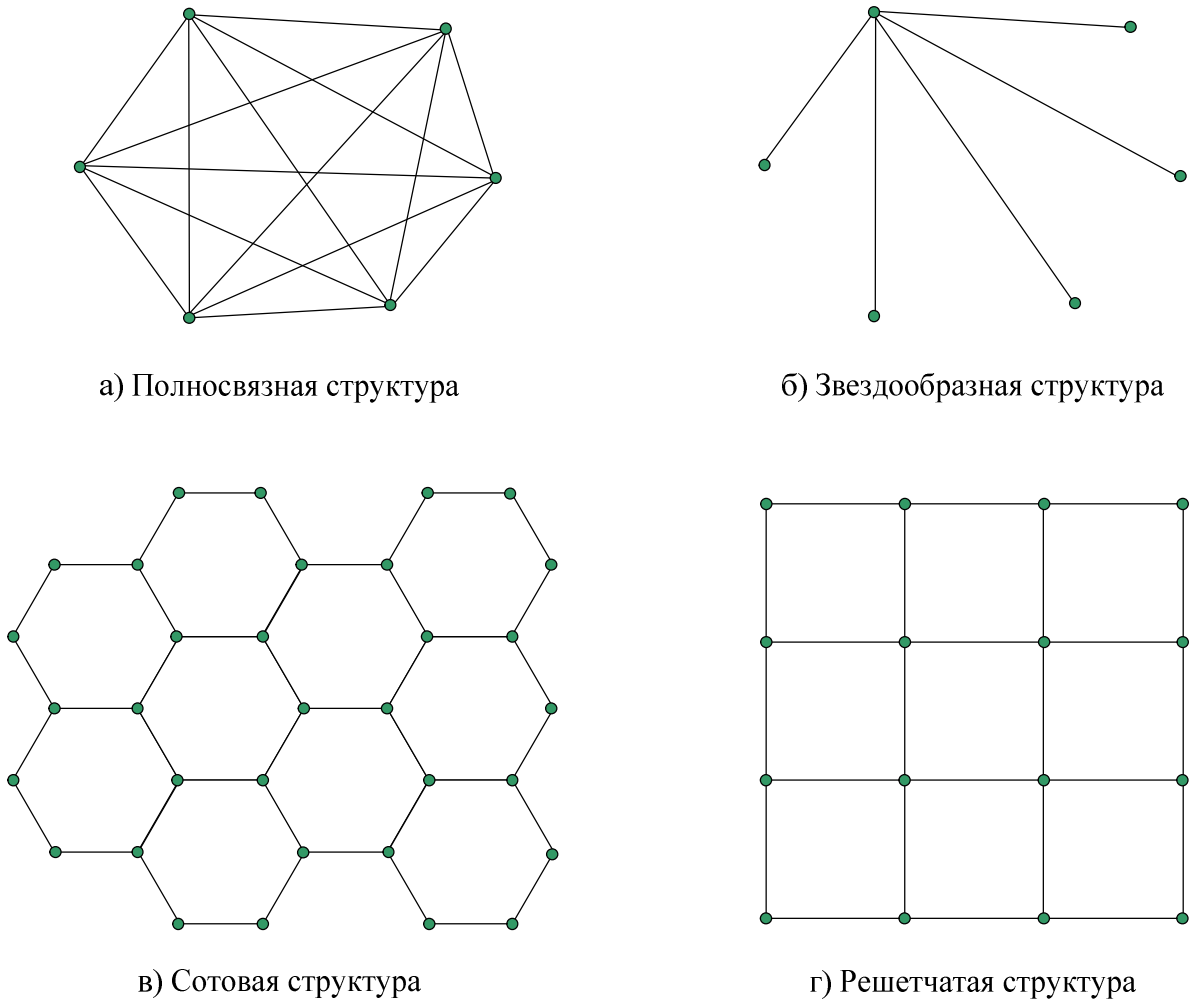


Рисунок 1.17. Примеры графов, используемых в качестве моделей телекоммуникационных сетей

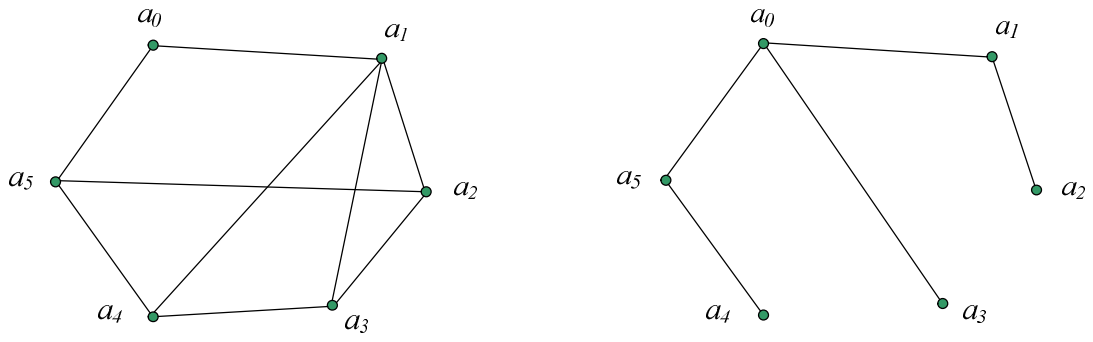
В полносвязной структуре все вершины графа соединяются по принципу "каждая с каждой". Число ребер в графе с N вершинами равно $N(N-1)/2$. Сети с такой структурой отличаются самой высокой надежностью. Пример применения полносвязной структуры – ГТС, построенная без применения транзитных станций.

В графе со структурой "звезда" одна из вершин является центральной. Подобным топологиям свойственна небольшая величина суммарной длины ребер графа, но низкая надежность. Число ребер в графе с N вершинами равно $(N-1)$. Звездообразная структура часто используется при построении сельских телефонных сетей (СТС).

Сотовая и решетчатая структуры похожи между собой. Сотовая топология известна по принципам создания современных сетей связи с подвижными объектами [35]. В рас-

сматриваемом примере сотовая и решетчатая структуры иллюстрируют возможные топологии транспортной сети. Они отличаются высокой надежностью и, как правило, большей экономичностью, нежели полносвязные структуры. Совокупность иерархических кольцевых топологий, на базе которых строятся современные транспортные сети, можно рассматривать как сотовые или решетчатые структуры.

Модели, показанные на рисунке 1.17, можно отнести к базовым. Другие модели образуются разными способами. Например, удаление некоторых ребер из полносвязной сети порождает граф произвольной структуры. Целенаправленное изъятие ряда ребер позволяет получить кольцевую, звездообразную и ряд других структур. Древовидная топология наилучшим способом отображает модель той сети доступа, которая была типичной для аналоговых автоматических телефонных станций (АТС). Два примера соответствующих графов показаны на рисунке 1.18.



а) Граф произвольной структуры

б) Граф с древовидной структурой

Рисунок 1.18. Два дополнительных примера графов, которые используются в качестве моделей телекоммуникационных сетей

Граф может быть представлен матрицей. Например, графу произвольной структуры – вариант (а) на рисунке 1.18 – соответствует такая матрица смежности $\| C_{ij} \|$:

$$\| C_{ij} \| = \begin{Vmatrix} - & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & - & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & - & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & - & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & - & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & - \end{Vmatrix} . \qquad (1.3)$$

Знак "–" указывает на отсутствие петель в графе. Цифра "0" ставится в том случае, если ребро между вершинами графа отсутствует. Если элемент на пересечении координат "i" и "j" равен единице, то между вершинами графа a_i и a_j существует ребро b_{ij}. Вместо цифры "1" в матрице могут быть проставлены иные величины, оценивающие расстояние между каждой парой вершин, стоимость линейных сооружений, пропускную способность каналов связи или другие атрибуты сети. Математические операции, разработанные для матриц [36], позволяют исследовать структурные характеристики телекоммуникационной сети. Полезные примеры, иллюстрирующие возможности применения теории матриц для решения задач планирования сетей, приведены в [15, 32].

1.2.3. Классификация систем массового обслуживания

Если Вы не знакомы с теорией массового обслуживания, загляните во второе Приложение. В нем приведены основные сведения из теории телетрафика, которые использу-

ются при исследовании инфокоммуникационных систем, а лучше прочитайте одну из монографий, посвященных этой тематике. Мне очень нравится двухтомник, который написал Л. Клейнрок [37, 38]. В этом параграфе будет рассматриваться ряд моделей СМО без подробных объяснений используемых терминов.

Существует множество моделей СМО. Для них были разработаны разные принципы классификации. Более пятидесяти лет назад была предложена классификация Кендалла [39], основанная на трех символах. Для описания сложных процессов функционирования современных инфокоммуникационных систем эта классификация была дополнена. Ряд дополнений к классификации Кендалла был предложен известным российским ученым в области теории массового обслуживания Г.П. Башариным. В современной технической литературе для описания сложных СМО часто используется классификация Кендалла, основанная на пяти символах. Простейшей (для исследования) моделью считается однолинейная СМО с пуассоновским входящим потоком заявок, время обслуживания которых подчиняется экспоненциальному закону. Такая СМО в классификации Кендалла обозначается следующим образом:

$$M/M/1/\infty/f_0^0. \tag{1.4}$$

Символ "M" в первой позиции определяет вид функции $A(t)$ – рисунок 1.15, правый фрагмент. Этот же символ во второй позиции определяет вид функции $B(t)$:

$$A(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \tag{1.5}$$

$$B(t) = 1 - e^{-\mu t}. \tag{1.6}$$

Величина λ определяет интенсивность входящего потока заявок. Математическое ожидание отрезка времени между двумя соседними заявками $A^{(1)} = \lambda^{-1}$. Цифра в круглых скобках (верхний индекс) определяет порядок момента случайной величины. Величина μ определяет интенсивность обслуживания заявок. Математическое ожидание времени обслуживания заявок $B^{(1)} = \mu^{-1}$.

В качестве символов в первой и во второй позициях классификации Кендалла часто используются следующие обозначения:

- E_r – распределение Эрланга порядка r;
- H_r – гиперэкспоненциальное распределение с r этапами;
- G – распределение с произвольным законом.

Третий символ определяет число обслуживающих приборов. Могут указываться число (1, 2, …) или буквенное обозначение – V. Иногда используют модели СМО с бесконечным числом обслуживающих приборов. В этом случае в третьей позиции классификации Кендалла ставится символ "∞".

Четвертая позиция отведена количеству мест для ожидания. Цифра "0" указывает на дисциплину обслуживания с потерями. Символ "∞" говорит о неограниченной емкости буферного накопителя.

Символ в пятой позиции определяет дисциплину обслуживания. Для описания механизма обслуживания обычно используется буква f. Нижний индекс при этой букве указывает на тип приоритета. Если приоритеты не назначаются, то этот индекс равен нулю (иногда в подобных случаях вместо буквы f используется буква d). Цифры "1" и "2" предназначены для идентификации относительных и абсолютных приоритетов. Верхний индекс, равный нулю, свидетельствует об отсутствии приоритета при постановке заявок в очередь. Другие значения этого индекса определяют соответствующие алгоритмы формирования очереди.

В первой и во второй позициях классификации Кендалла, при необходимости, может использоваться несколько символов, что требуется для идентификации сложных процессов как для потоков на входе СМО, так и для алгоритмов обслуживания заявок. В качестве

примера СМО такого рода можно привести модель звена сигнализации. Она была предложена в [40]:

$$M, Б / HD, D / 1 / \infty / f_1^0. \qquad (1.7)$$

Сложность описания модели состояла в том, что при отсутствии данных, которыми необходимо обмениваться для установления соединений, передаются так называемые "заполняющие" сигнальные единицы (СЕ), служащие для синхронизации звена. Эти СЕ имеют постоянную длину и не переспрашиваются при искажении в процессе передачи. Символ "$Б$" означает бункер бесконечной емкости, расположенный на входе СМО. Он как бы генерирует поток "заполняющих" СЕ, каждая из которых обслуживается в течение фиксированного времени (символ "D" во второй позиции после запятой). Последний символ в выражении (1.7) указывает на обслуживание с относительным приоритетом. Это означает, что из очереди на обслуживание сначала выбираются СЕ, содержащие полезную информацию. Поток этих СЕ полагается пуассоновским – символ "M" в первой позиции перед запятой. Символ "HD" во второй позиции (перед запятой) используется для обозначения ступенчатой ФР длительности обслуживания СЕ. Такой характер этой ФР объясняется двумя факторами:

- все СЕ имеют переменную длину, кратную одному байту, в заранее заданном диапазоне;
- в процессе передачи СЕ может искажаться, что ведет к ее переспросу вплоть до получения достоверной информации.

В [41] приводится иное расширение классификации Кендалла. Вводится еще одна позиция, которая говорит о численности источников нагрузки. Обычно этот параметр можно учитывать при описании характера входящего потока заявок. По этой причине далее в монографии будет использоваться классификация Кендалла, основанная на пяти позициях.

На рисунке 1.19 приведен пример классификации СМО. В качестве важнейших признаков выбраны алгоритмы обработки заявок и число обслуживающих приборов.

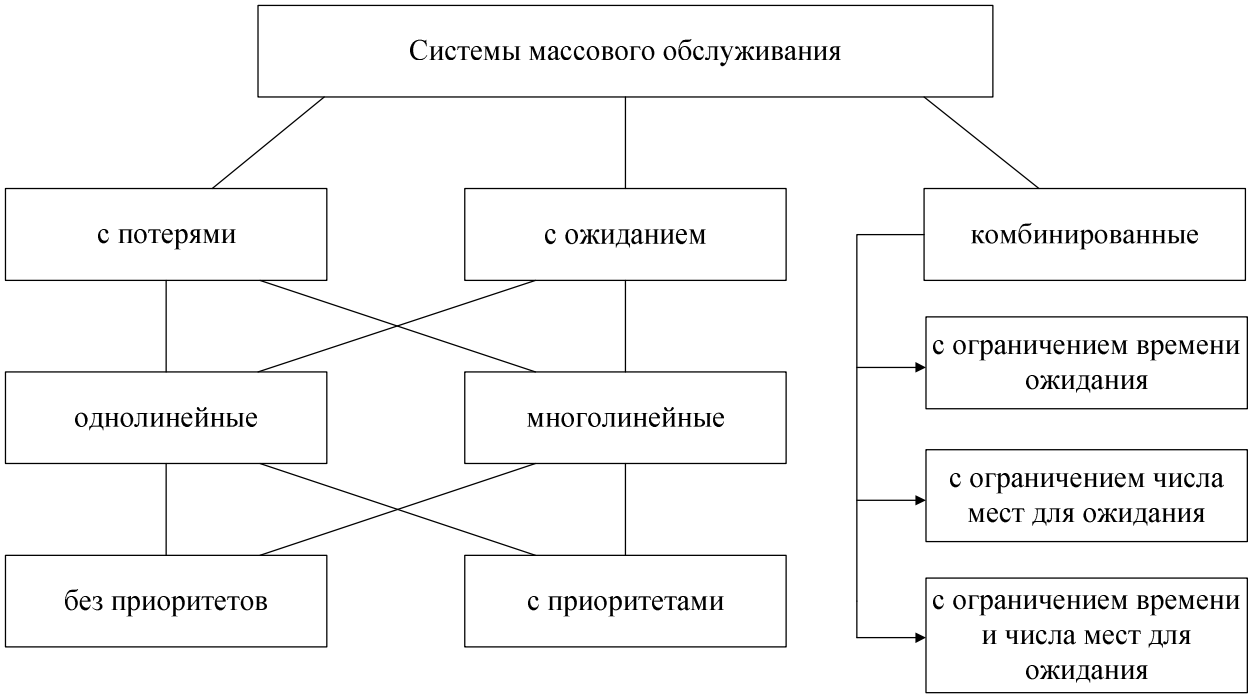


Рисунок 1.19. Пример классификации СМО

Все виды СМО можно разделить на три группы. В первую группу входят СМО, в которых при занятости всех обслуживающих приборов приходящие заявки теряются. Характерным примером таких СМО может служить модель пучка соединительных линий (СЛ)

между аналоговыми коммутационными станциями местной телефонной сети. СМО, в которых все приходящие заявки ждут начала обслуживания и не теряются, относятся ко второй группе. Такую модель следует считать идеализированной, но при очень малых величинах вероятности потерь заявок она может оказаться весьма полезной с точки зрения анализа характеристик СМО. Типичным примером СМО, входящих во вторую группу, служит модель уже упомянутого звена сигнализации. В третью группу входят СМО, в которых возможность ожидания ограничена. Подобный алгоритм используется, например, в справочной службе телефонной сети. Если все операторы-телефонисты в данное время заняты, то часть вновь поступивших вызовов ставится в очередь. Когда очередь превышает некоторый предел, все новые вызовы теряются.

Комбинированные СМО, образующие третью группу, принято делить на следующие классы:

- системы с ограничением времени ожидания;
- системы с ограничением числа мест для ожидания;
- системы, в которых ограничены как время ожидания, так и число мест для ожидания.

Дисциплина обслуживания с ограничением времени ожидания принята, например, в АТС координатного типа. После снятия микротелефонной трубки к абонентской линии (АЛ) подключается регистр, после чего абонент получает зуммер "Ответ станции". Этот зуммер передается в течение заранее оговоренного времени – t_{OC}. Если абонент не начинает набор номера, то после истечения времени t_{OC} регистр освобождается. Абонент уведомляется об этом факте зуммером "Занято". Ограничение мест для ожидания обычно объясняется дефицитом памяти. В частности, некоторые типы автоответчиков рассчитаны на запись заранее заданного числа сообщений. Справочные службы можно считать характерным примером систем, в которых ограничены как количество мест для ожидания, так и длительность ожидания начала обслуживания.

Все виды СМО принято делить на однолинейные и многолинейные. Примером однолинейной системы можно считать АЛ, используемую для подключения к АТС двух терминалов, принадлежащих разным абонентам (так называемое спаренное включение телефонных аппаратов). Типичный пример многолинейной СМО – пучок СЛ между коммутационными станциями в сети телефонной связи. Первые системы коммутации использовали дисциплину обслуживания без приоритетов. Это объясняется рядом причин, среди которых можно выделить сложность реализации приоритетного обслуживания без систем с программным обеспечением. Появление систем коммутации с программным обеспечением позволило ввести (там, где это целесообразно) приоритетное обслуживание. СМО с приоритетами, в свою очередь, можно разделить на несколько классов, но пока мы ограничимся только примерами классификации, приведенными выше (на рисунке 1.19). Классификацию СМО с приоритетами можно найти во втором Приложении к данной монографии, а также в [38] или в другой книге, посвященной данной этой дисциплине обслуживания заявок.

Некоторые процессы обслуживания заявок целесообразно представлять при помощи совокупности нескольких СМО. Подобные модели обычно называют сетями массового обслуживания (СеМО). Интерес к моделям, которые относятся к классу СеМО, связан с изучением характеристик качества обслуживания в телекоммуникационных сетях. В этом случае необходимо анализировать процесс прохождения заявок через несколько СМО, что, как правило, заметно усложняет получение искомых результатов. На рисунке 1.20 показан пример СеМО. Она, в частности, служит хорошей моделью для исследования процессов передачи пакетов через IP сеть.

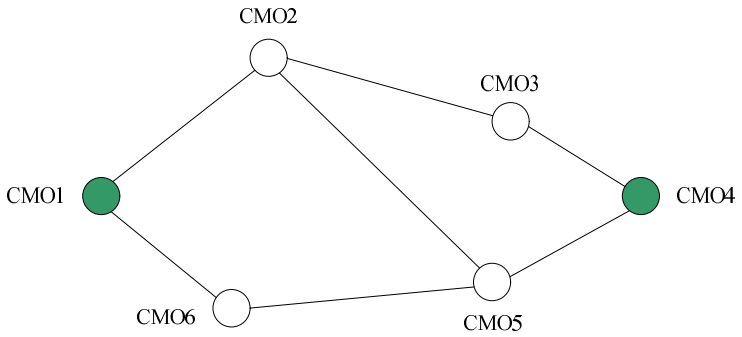


Рисунок 1.20. Пример сети массового обслуживания

СМО1 и СМО4 формализуют процессы функционирования центров коммутации пакетов (ЦКП), через которые терминалы осуществляют обмен информацией. Кружки, соответствующие этим двум СМО, окрашены в темный цвет. Четыре другие СМО служат моделями для транзитных ЦКП. Любую СеМО можно представить при помощи графа, структура которого определяется принципом обслуживания заявок.

Маршрут передачи пакета между ЦКП представим последовательностью СМО. Ее обычно называют многофазной системой массового обслуживания.

Omne initum difficile est.
(Всякое начало трудно)

1.3. Декомпозиция математических моделей

Слово "декомпозиция" – применительно к математическим моделям – используется для выделения объектов, более простых с функциональной или структурной точки зрения. Это положение иллюстрирует рисунок 1.21. В верхней его части показана гипотетическая сеть доступа. В левом нижнем углу рисунка приведен пример декомпозиции модели на одну транспортную и две коммутируемые сети. В правом нижнем углу показан пример декомпозиции сети доступа на два уровня иерархии.

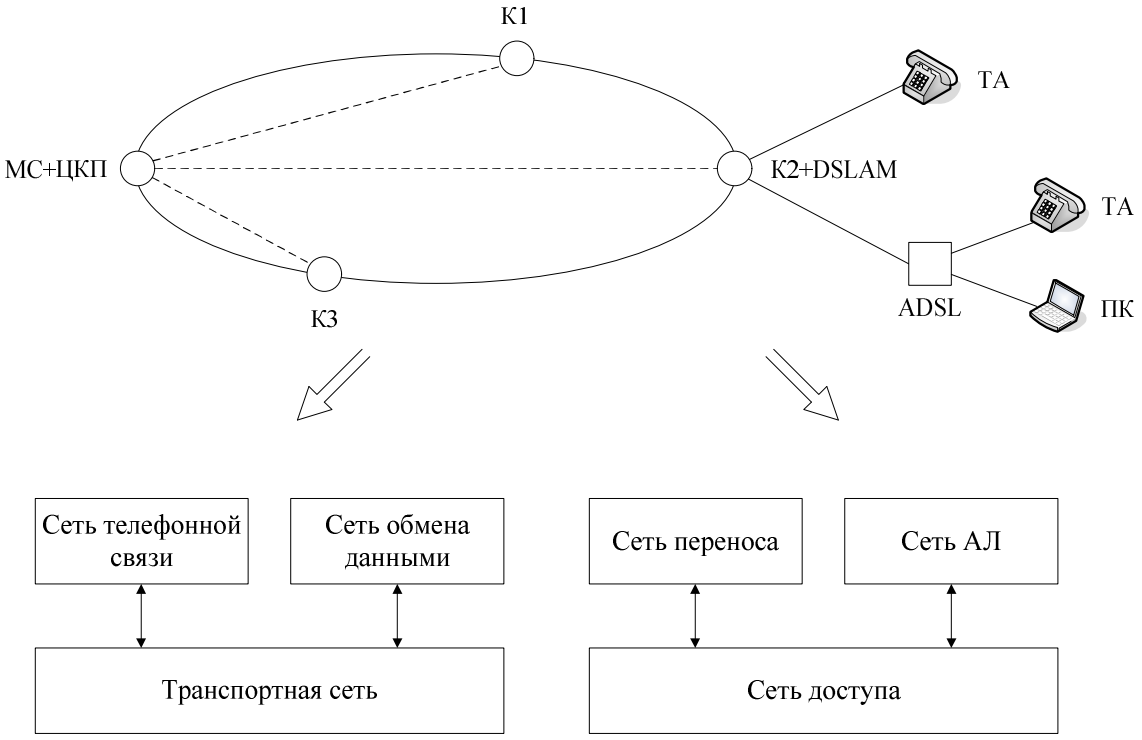


Рисунок 1.21. Декомпозиция сети доступа

Декомпозиция модели на одну транспортную и две коммутируемые сети упрощает решение задач планирования, касающихся трех важных вопросов:

- разработки структуры транспортной сети (выбор трасс для прокладки кабеля или мест размещения базовых станций при использовании беспроводных систем);
- поиска оптимальных структур коммутируемых сетей (например, по критерию минимальных капитальных затрат);
- выбора принципов технической эксплуатации телекоммуникационной сети, включая поддержку процессов ее развития.

Транспортная сеть для рассматриваемой модели образована кабелем с ОВ, который проложен по кольцу. Рядом с каждым концентратором устанавливается МВК, который обеспечивает коммутируемые сети транспортными ресурсами. МВК, в данном случае, выполняет функции сетевого узла (СУ) транспортной сети [42]. Структура коммутируемой сети показана пунктирными линиями. Она может быть представлена графом с топологией вида "звезда".

Рядом со вторым концентратором установлен мультиплексор DSLAM, который обеспечивает включение цифровых абонентских линий. В рассматриваемом примере предполагается, что используется технология ADSL (асимметричная цифровая АЛ). От концентратора до терминального оборудования транспортная сеть доступа построена на проложенных ранее кабелях с медными жилами. Для концентратора К2 в правой верхней части рисунка 1.21 показано включение ТА по двухпроводной цепи, а также ТА и ПК (персонального компьютера) через оборудование ADSL.

Концентраторы (выносные модули МС) и мультиплексоры DSLAM относятся к оборудованию разных коммутируемых сетей. Они связаны соответственно с МС и ЦКП, которые расположены в одном здании. Вместе с ними размещается СУ, в качестве которого могут использоваться МВК либо цифровой кроссовый узел (ЦКУ). На рисунке 1.22 показана иная (по сравнению с рассматриваемой моделью) трактовка деления инфокоммуникационной системы на одну транспортную и две коммутируемые сети. Похожий способ объяснения принципов декомпозиции был использован, например, авторами монографии [15]. Он не содержит некоторых второстепенных деталей, но очень удачен для понимания места и функций транспортных и коммутируемых сетей.

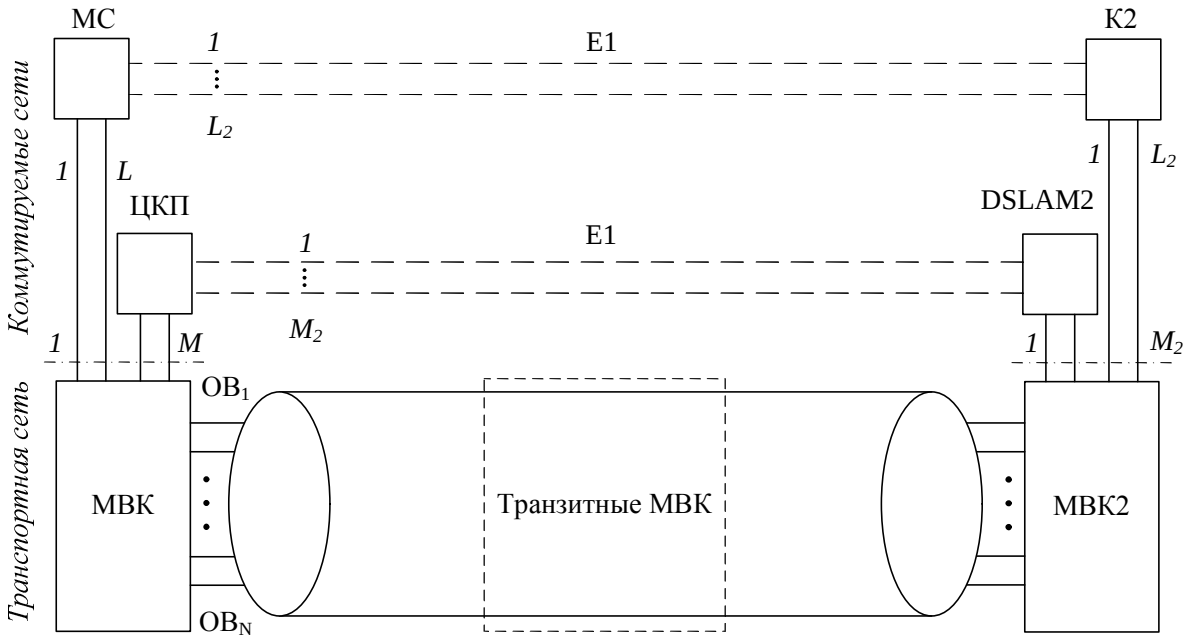


Рисунок 1.22. Вторая трактовка принципов декомпозиции сети

МВК, расположенный в левой нижней части рисунка 1.22, не имеет номера. Он расположен в одном здании с МС и ЦКП. Между МВК и МВК2 проложен кабель, который содержит множество ОВ, общее количество которых равно N. Тракты обмена информацией, организованные по этим волокнам, могут проходить через несколько транзитных МВК. Совокупность трактов, которые образованы на базе этих волокон, представляет собой транспортные ресурсы для двух коммутируемых сетей. В данном примере речь идет о сетях телефонной связи и обмена данными. Границы транспортной и коммутируемых сетей показаны штрихпунктирными линиями.

В коммутационном поле МВК устанавливаются полупостоянные соединения, что позволяет реализовать практически любую структуру для каждой коммутируемой сети. В модели, показанной в верхней части рисунка 1.21, между МС и ее концентраторами, а также между ЦКП и каждым мультиплексором DSLAM образуются прямые связи. На рисунке 1.22 эти связи показаны в виде совокупности стандартных цифровых трактов Е1 с пропускной способностью 2048 кбит/с, соединяющих МС с К2 и ЦКП с DSLAM2 (в данном примере предполагается, что транспортные ресурсы в сети обмена данными формируются за счет использования трактов Е1, что не столь существенно для задач декомпозиции). Транспортные ресурсы, выделяемые в коммутируемые сети, составляют L_2 и M_2 трактов Е1 соответственно.

В результате, коммутируемые сети создаются на основе звездообразных структур. Транспортная сеть строится на базе кольцевой топологии. Транспортные ресурсы при необходимости могут перераспределяться между коммутируемыми сетями. Если часы наибольшей нагрузки (ЧНН) в коммутируемых сетях не совпадают, то перераспределение транспортных ресурсов позволяет существенно повысить качество обслуживания трафика. Некоторые оценки эффективности подобных процедур приведены, например, в [43].

Декомпозиция модели инфокоммуникационной системы на общую транспортную и совокупность коммутируемых сетей – простая задача. Продуктивность такого подхода с точки зрения решения задач по планированию телекоммуникационных сетей очевидна. По всей видимости, использование декомпозиции можно рассматривать как характерный пример применения методов исследования сложных систем к задачам изучения сетей электросвязи.

Вернемся к рисунку 1.21 и рассмотрим второй аспект декомпозиции модели сети доступа, который связан с ее иерархическими уровнями. Для анализируемой модели логично выделить два уровня иерархии, изображенные на рисунке 1.23. В некоторых случаях – для крупной сети переноса – можно выделить и три уровня иерархии. Для каждого иерархического уровня возможна декомпозиция сети доступа на транспортный и коммутируемые компоненты, но такой подход используется в практике планирования очень редко.

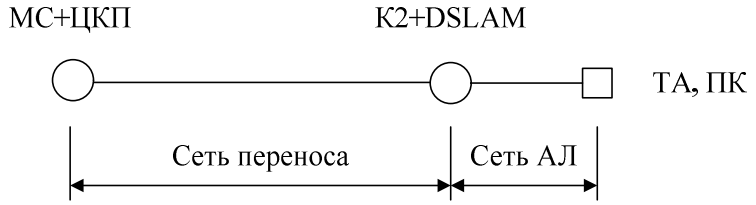


Рисунок 1.23. Уровни иерархии в сети доступа

Два основных принципа декомпозиции математических моделей, соответствующих телекоммуникационным сетям, позволяют упростить решение многих задач, относящихся к планированию инфокоммуникационной системы. Перечень наиболее сложных задач планирования сети приведен в следующем разделе. Хотя в качестве примера в разделе 1.3 была выбрана сеть доступа, идея декомпозиции применима на всех уровнях иерархии инфокоммуникационной системы.

Finis unius diei est principium alterius.
(Конец одного дня является началом другого)

1.4. Наиболее сложные задачи планирования сетей

1.4.1. Причины усложнения некоторых задач

Большинство задач по планированию сети можно условно разделить на простые и сложные. Подобная классификация зависит от ряда объективных и субъективных причин. Целесообразно выделить четыре существенные причины, влияние которых необходимо учитывать в практической деятельности.

Во-первых, современный инфокоммуникационный бизнес не допускает простой формулировки задачи планирования телекоммуникационных сетей. Именно по этой причине в разделе 1.1 говорилось о разработке нескольких сценариев развития сети. Сценарии могут различаться не только способами достижения одной и той же цели. В некоторых случаях будут различаться функциональные возможности сети в будущем, то есть конечная цель модернизации инфокоммуникационной системы.

Во-вторых, следует учитывать конкретные условия построения или модернизации телекоммуникационной сети. В некоторых случаях, одна и та же задача может оказаться простой или сложной. Характерный пример – выбор оптимальной структуры включения выносных концентраторов в МС. При построении новой сети можно учесть все известные перспективные требования при разумных ограничениях экономического и технического характера. Задачу планирования сети в подобных случаях можно считать сравнительно простой. Иная ситуация складывается при разработке проекта для модернизации уже эксплуатируемой сети. Часто (правда, не всегда) такая задача становится сложной и с технической, и с экономической точки зрения.

В-третьих, новые технологии радикально трансформируют некоторые виды задач планирования сети. Удачная иллюстрация этого утверждения – IP технология, принятая для ССП. С точки зрения теории массового обслуживания в эксплуатируемой ТФОП была актуальна задача расчета емкости пучка СЛ между выносным модулем (УАТС или концентратором) и опорной МС. Соответствующие расчеты выполнялись по формулам Эрланга или Энгсета [33], давно известным специалистам по телетрафику. IP технология радикально меняет саму постановку подобных задач. Их решение связано с детальным анализом приоритетных СМО. Исследование таких моделей – сложная научная задача.

В-четвертых, диверсификация требований потенциальных клиентов Оператора требует решения ряда задач, для которых необходимо знать статистические данные, касающиеся, в частности, уровня доходов юридических и физических лиц. Не секрет, что официальную информацию такого рода нельзя считать достоверной [44]. К сожалению, значительная часть методов прогнозирования основана именно на таких статистических данных. Поэтому их использование может привести к серьезным просчетам.

Аспекты сложности, перечисленные выше, в основном связаны с задачами, которые возложены на лицо, обосновывающее решение (ЛОР). К сложным следует также отнести и задачи, которые типичны для лица, принимающего решение (ЛПР). Дело в том, что некоторые задачи, стоящие перед ЛПР, плохо поддаются формализации. Их, как правило, нельзя решить только за счет использования математических методов. Кроме того, последствия ошибок ЛПР могут оказаться катастрофическими для Оператора связи и его клиентов.

В следующих параграфах этого раздела рассматривается ряд задач, которые следует считать наиболее сложными при планировании телекоммуникационных сетей. Их можно классифицировать как новые по сравнению с задачами, традиционными для планирования сетей [14 – 17]. Конечно, задачи, названные "традиционными", также изменились. Это неизбежно при радикальном изменении инфокоммуникационной системы, свойственном началу XXI века. Тем не менее, трансформация "традиционных задач", как правило, не существенно повышает сложность их решения. По этой причине далее акцентируется внимание только на новых задачах планирования телекоммуникационных сетей.

1.4.2. Изменение структуры телекоммуникационной сети

Методы решения основных задач по выбору структуры телекоммуникационной сети изложены, например, в [14 – 17]. Они связаны, в основном, с синтезом структуры вновь создаваемой сети. Подобные методы развиваются с учетом новых тенденций эволюции инфокоммуникационной системы. В частности, в [45] предложены методы планирования сетей доступа с учетом использования выносных модулей.

Апробированные методы выбора структуры телекоммуникационных сетей обычно малоэффективны для решения новых задач двух видов. Задачи первого вида связаны с экономичным введением новых элементов. С точки зрения теории графов речь идет об определении минимального числа ребер и мест их размещения для присоединения новых вершин. Задачи второго вида касаются разумного изменения структуры сети в процессе ее качественной реконструкции. В подобных случаях можно говорить о радикальном пересмотре структуры графа с изменением количества его вершин и выбором новых принципов их связи.

В левой части рисунка 1.24 показан граф, состоящий из четырех вершин. Далее предполагается, что к моменту построения гипотетической транспортной сети – t_0 ее структура была оптимальной. Это означает, что кольцо, образованное ребрами графа, позволило построить сеть с минимальными затратами. В обозримой перспективе, которая определена моментом времени t_f, в состав этой сети необходимо включить три новых узла. Соответствующие вершины графа обозначены буквами a_5, a_6 и a_7.

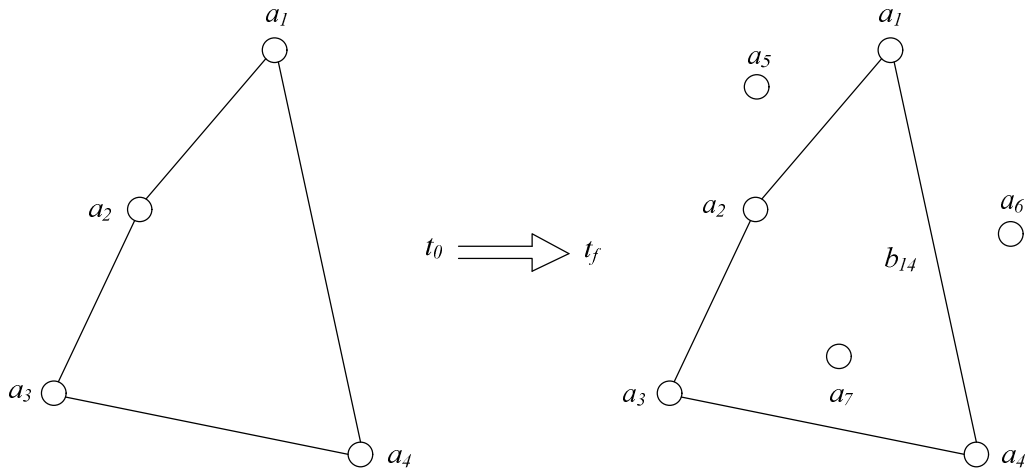
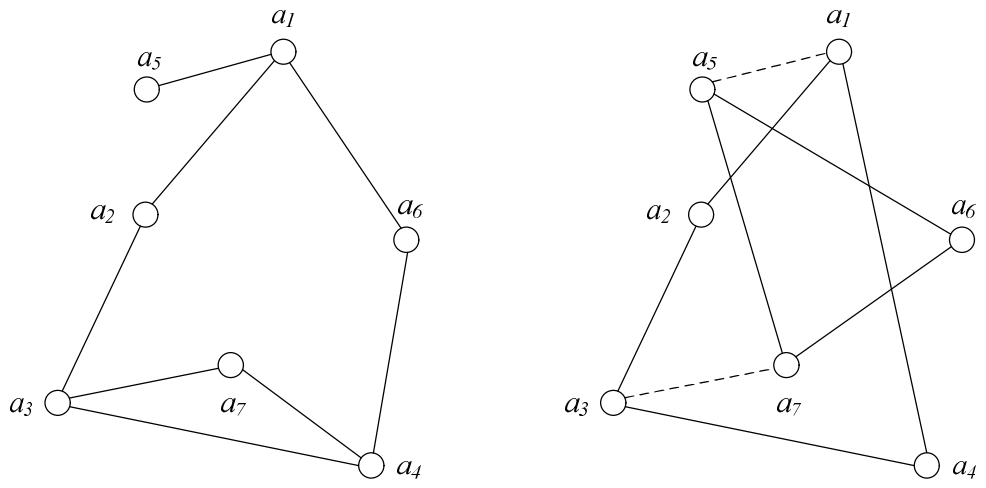


Рисунок 1.24. Пример изменения численности узлов в транспортной сети

Постановка задачи модернизации транспортной сети, структура которой показана на рисунке 1.24, может быть обусловлена следующими обстоятельствами:

- в составе сети появляется один новый узел (вершина a_7), типичный пример которого для ГТС – крупная УАТС;
- вследствие нового строительства формируются две группы потенциальных абонентов (вершины a_5 и a_6), которые должны быть подключены к сети.

Если речь идет о создании новой транспортной сети из семи СУ, то проблему можно свести к "задаче коммивояжера" [8, 30]. Для задач, касающихся расширения транспортной сети, такой подход, как правило, не может быть использован. На рисунке 1.25 в качестве примера показаны два варианта решения поставленной задачи. Безусловно, эти варианты не охватывают всех возможных путей расширения транспортной сети.



а) Дополнение существующего кольца б) Формирование второго кольца

Рисунок 1.25. Пример изменения численности элементов в транспортной сети

Вариант (а) предусматривает присоединение трех новых СУ (вершины a_5, a_6 и a_7) к уже созданному ранее кольцу. Это присоединение может быть выполнено разными способами. Для выбранного примера рассматриваются три ситуации:

- первый из новых СУ (вершина a_5) может быть связан только с одним из эксплуатируемых узлов транспортной сети (в рассматриваемом примере – с вершиной a_1);
- для другого СУ (вершина a_6) возможно включение в "разрыв" ребра между вершинами a_1 и a_4, что эквивалентно дополнению созданного ранее кольца;
- последний СУ (вершина a_7) связывается с двумя узлами, установленными ранее, что обеспечивает его надежное присоединение к транспортной сети за счет образования кольца $a_3 - a_4 - a_7$.

Вариант (б) иллюстрирует иной способ создания второго кольца. Оно объединяет три новых СУ. Оба кольца должны быть связаны между собой. На рисунке 1.25 такая связь обеспечивается за счет организации двух линий передачи. Они изображены в правой части модели пунктирными линиями – ребра между вершинами графа a_1 и a_5, а также a_3 и a_7.

К задаче, рассматриваемой в этом параграфе, мы вернемся в самом конце последнего раздела первой главы монографии. В нем будут изложены положения, формулируемые как поиск *рационального решения* применительно к выбору структуры транспортной сети.

Для разработки методов планирования современных телекоммуникационных сетей необходимо оценить типичное количество вновь вводимых СУ – K_N. Анализ ряда задач, которые обсуждались с Операторами ТФОП, позволяет сделать предварительные выводы, существенные с практической точки зрения. В частности, для сетей международной и междугородной связи подобные задачи не представляют интереса. Данное утверждение объясняется тем, что точки размещения международных центров коммутации (МЦК) и автоматических междугородных телефонных станций (АМТС) уже давно определены. Появление новых мест расположения МЦК и АМТС – большая редкость. Такая же ситуация характерна для большинства СТС. Для ГТС и незначительной части СТС, как правило, справедливо такое неравенство: $K_N \le 3$. Максимальное значение можно найти в задачах модернизации сетей доступа, для которых обычно $K_N \le 5$.

Очевидно, что при $K_N \le 5$ оптимальное решение может быть найдено полным перебором всех возможных вариантов. Важнее установить совокупность правил, которые должны использоваться для перечисления возможных вариантов присоединения новых СУ к эксплуатируемым транспортным сетям. Похожее утверждение прозвучало на одном из последних международных конгрессов по теории телетрафика: адекватное отражение смысла функционирования элементов сети при разработке модели подчас становится важнее, чем точность последующего математического анализа.

В начале данного параграфа упоминалось о задачах второго вида. Они связаны с процессами качественной модернизации телекоммуникационной сети. В таких случаях следует рассматривать задачи с возможностью радикальных изменений структуры графа, включая количество вершин и способы их связи. Анализ статистической информации [4] свидетельствует о возможном уменьшении численности МС при цифровизации ГТС в два и более раза. Не менее впечатляющее снижение количества элементов в сети ожидается при переходе к ССП [46].

В подобных ситуациях целесообразно использовать метод модернизации сети, который основан на поиске оптимума к моменту достижения конечной цели. Этот метод иллюстрируется при помощи модели, показанной на рисунке 1.26.

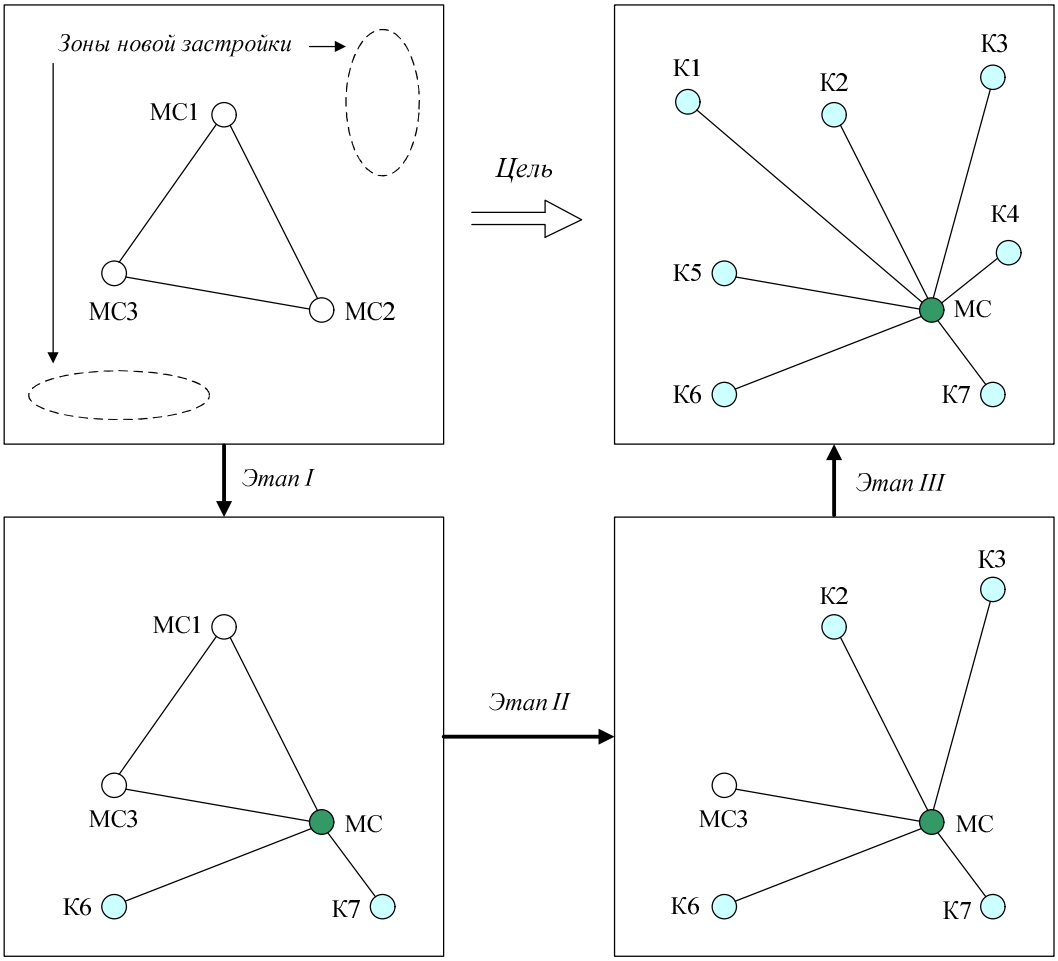


Рисунок 1.26. Модернизация сети, основанная на достижении известной цели

Данная модель детализирует пример, приведенный в разделе 1.1. На рисунке 1.26 изображены три эксплуатируемые МС в составе ГТС без узлов. В границах города пунктирными линиями показаны две зоны новой застройки, на территории которых вскоре появятся новые абоненты ТФОП. Предполагается, что Оператор не ставит перед проектной организацией задачу по переводу сети на технологию "коммутация пакетов".

Подходы к планированию рассматриваемой ГТС могут существенно различаться. Иллюстрацией такого утверждения служат следующие возможные стратегии развития ГТС:

- по мере возникновения конкретной проблемы (необходимость телефонизации в зоне новой застройки или замены эксплуатируемой МС) разрабатывается оптимальное решение;
- определяется оптимальная структура ГТС к моменту завершения процесса ее модернизации, а решение возникающих конкретных задач осуществляется так, чтобы они способствовали реализации выбранной топологии.

Первая стратегия для рассматриваемой модели ГТС, по всей видимости, приведет к структуре, в которой пять МС связаны между собой по принципу "каждая с каждой". Это утверждение основано на простой логической цепочке. Во-первых, каждая МС будет в разное время заменена современной цифровой коммутационной станцией. Еще две МС будут установлены в зонах новой застройки. Таким образом, Оператор ГТС решает пять самостоятельных задач, возникающих в разное время. Для каждой из этих задач можно найти оптимальное решение, используя известные экономико-математические методы, которые разработаны для планирования сетей телефонной связи [14 – 18, 21 – 23]. Пять оптимальных решений, последовательно реализованных в разное время, не гарантируют эффективность конечного результата – полностью модернизированной ГТС. Более того, конечный результат для большинства проектов будет самым неудачным.

Вторая стратегия основана на том, что сначала определяется оптимальное решение на момент завершения процесса модернизации ГТС. Данное решение также может быть получено за счет использования упомянутых экономико-математических методов. Затем должна быть разработана программа достижения поставленной цели. Формализация этого процесса – сложная задача. Методологический подход к ее решению изложен в третьей главе монографии. Очевидно, что реализация второй стратегии гарантирует переход к оптимальной структуре ГТС. Данное утверждение не означает, что на каждом отдельном этапе модернизации потребуются инвестиции, которые будут меньше, чем затраты, свойственные первой стратегии эволюции сети. Именно такая ситуация была показана на рисунке 1.12, который иллюстрирует поведение инвестиций I_{ij}. Индекс i на рисунке 1.12 идентифицирует номер рассматриваемого сценария.

Первая стратегия представима цепочкой: $I_{10} \to I_{11} \to I_{12} \to I_{13}$. Для второй стратегии аналогичная последовательность такова: $I_{30} \to I_{31} \to I_{32} \to I_{33}$. Опыт развитых и многих развивающихся стран говорит о том, что Операторы ТФОП выбирают вторую стратегию развития сетей телефонной связи. Для выбранной модели на рисунке 1.26 показаны три этапа модернизации ГТС, ведущие к реализации оптимального решения. Предполагается, что минимизация суммарных затрат Оператора при соблюдении заданных требований к сети достигается за счет установки одной МС большой емкости с семью выносными концентраторами.

На этапе I демонтируется МС2. На освободившихся площадях устанавливается современная коммутационная станция. В ГТС после завершения процесса модернизации останется только одна МС. По этой причине на рисунке 1.26 ей не присвоен номер. Предположим, что обслуживание абонентов демонтированной станции осуществляется МС и одним концентратором – К7. Кроме того, на этапе I вводится эксплуатацию К6. Этот концентратор обслуживает абонентов, расположенных в одной из зон новой застройки.

На этапе II должна быть заменена МС1. Терминалы, которые она обслуживала, переключаются в концентратор К2. В зоне новой застройки монтируется оборудование К3. Оба концентратора являются выносными модулями МС. Число концентраторов для рассматриваемой модели выбрано произвольно. Основные аспекты расчета оптимального числа концентраторов и оценки их емкости обсуждаются в третьей главе монографии.

На этапе III демонтируется последняя из установленных ранее коммутационных станций – МС3. Предполагается, что она заменяется двумя концентраторами – К1 и К5.

Кроме того, в правом верхнем углу показан еще один концентратор – К4. Допустим, что его установка способствует минимизации затрат на построение сети доступа.

Реализация проектов, подобных рассмотренному выше примеру, связана с ревизией базовых положений построения местных телефонных сетей. В частности, целесообразен отказ от использования распределительных кабельных шкафов (ШР), а также снижение длин АЛ в зоне прямого питания (ЗПП). Реализация таких мер будет способствовать снижению затрат на поддержку инфокоммуникационных услуг, которые подразумевают использование широкополосного доступа.

Следует подчеркнуть, что изменение структуры сети, как правило, связано с рядом организационных проблем. Они могут весьма существенно повлиять на формирование проектных решений. К сожалению, часть подобных проблем проявляется лишь в процессе практической реализации принятых решений.

Последнее замечание связано с вопросами, которые рассматриваются в следующем параграфе. В ряде случаев выбор оптимальной структуры сети должен осуществляться совместно с решением вопросов, касающихся используемых технологий. Значительные структурные изменения произойдут в транспортной сети доступа. В третьем Приложении рассматриваются вопросы, которые связаны с исследованием структурных характеристик сетей доступа.

1.4.3. Выбор используемых технологий

Большинство публикаций, посвященных современным инфокоммуникационным технологиям, ориентировано на проектирование гипотетической сети. Когда речь заходит о конкретной телекоммуникационной сети, очевидные, на первый взгляд, выводы подчас становятся сомнительными. Например, в последнее время появились публикации, подчеркивающие эффективность решения Ethernet поверх оптического волокна. По всей видимости, такой вариант построения сети экономичен и обеспечивает большинство требований технического характера. Однако не следует забывать, что во многих случаях транспортная сеть уже создана на базе технологии синхронной цифровой иерархии (она известна по аббревиатуре SDH). Тогда с высокой вероятностью можно предположить, что оптимальным будет другое решение. Скорее всего, эффективным вариантом станет использование связки технологий, которая в англоязычной технической литературе получила название "Ethernet over SDH".

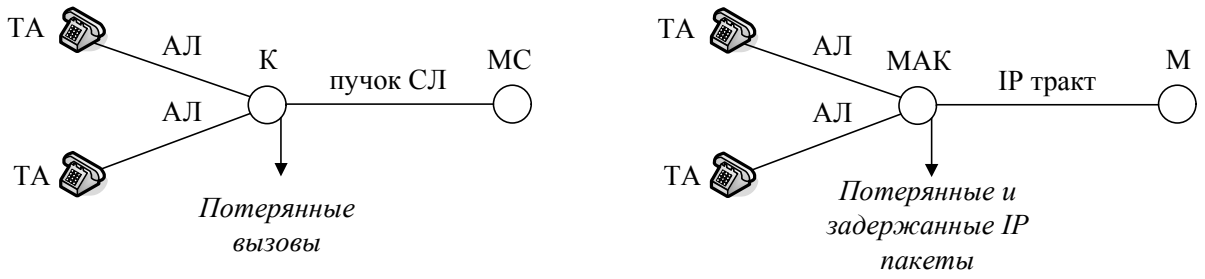
В этом разделе рассматриваются задачи, усложняющие процесс планирования сети. На предыдущих этапах развития ТФОП проектировщики не сталкивались с серьезными проблемами, что объяснялось отсутствием альтернатив. Например, при проектировании транспортной сети для ГТС пятьдесят лет назад использовались только физические цепи в многопарных кабелях. Это означало, что технология передачи была предопределена. Похожая ситуация в те же годы складывалась и с технологией коммутации.

В настоящее время ситуация радикально изменилась [4]. Анализ тех технологий, которые могут использоваться для создания и развития инфокоммуникационных систем, нельзя проводить автономно – без учета аспектов структуры сети и обслуживаемого трафика. Например, технологии, разработанные для проводных средств электросвязи, подразумевают выбор сети, структура которой может быть кольцевой, звездообразной, сотовой, древовидной или какой-то иной. Если планируется использование беспроводных технологий, то кольцевая структура, по всей видимости, выпадает из перечня возможных решений. Технология обслуживания трафика может радикально изменить все принципы расчета сети. Именно такая ситуация складывается с ССП. Данный вопрос подробно рассматривается в следующем параграфе.

1.4.4. Оценка обслуживаемого трафика

Оценка обслуживаемого трафика осуществляется с двух точек зрения. Во-первых, большой практический интерес представляют параметры трафика, которые определяют требования к пропускной способности транспортной сети и производительности средств распределения информации в коммутируемых сетях, а также ряд других атрибутов. С этой точки зрения оценка трафика тесно связана с вопросами его прогнозирования, которым посвящен параграф 1.4.5. Во-вторых, оценка трафика подразумевает исследование СМО. Методологические аспекты таких оценок изложены во втором Приложении.

Рисунок 1.27 иллюстрирует влияние технологии коммутации на принципы оценки обслуживаемого трафика. В левой части модели показан пример обслуживания трафика речи, который поступает в концентратор, использующий метод коммутации каналов. В правой части рисунка 1.27 изображен фрагмент телекоммуникационной сети, основанный на технологии "коммутация пакетов". Тогда пакеты обслуживаются в мультисервисном абонентском концентраторе (МАК).



а) Обслуживание трафика речи для технологии “коммутация каналов”

б) Обслуживание трафика речи для технологии “коммутация пакетов”

Рисунок 1.27. Технологии коммутации и способы оценки трафика

Если в пучке СЛ, который соединяет концентратор и местную станцию, заняты все линии, то поступающие вызовы теряются. Этот факт подчеркнут надписью "Потерянные вызовы", выполненной курсивом. Для технологии "коммутация пакетов" меняется подход к обслуживанию трафика и соответствующая система понятий. Обслуживание трафика целесообразно рассматривать как процесс обмена IP-пакетами. МАК, маршрутизатор (М) или соединяющий их IP тракт могут быть перегружены. Тогда IP-пакеты могут теряться или задерживаться свыше допустимой величины.

Оба концентратора (обычный и мультисервисный) можно рассматривать как СМО. Различие моделей будет весьма существенным. В первую очередь, данное утверждение касается одного из базовых понятий теории телетрафика – заявки. Для систем коммутации каналов под заявкой обычно понимается вызовов. В классической телефонии эти понятия тождественны. Для МАК заявкой следует считать каждый IP-пакет, который должен быть передан в маршрутизатор.

Следующее важное понятие в теории телетрафика – время обслуживания. В сетях телефонной связи оно определяется длительностью разговора, а также – для некоторых задач – временем установления соединения. Для сетей с коммутацией пакетов время обслуживания заявки равно длительности передачи или обработки IP-пакета.

Целесообразно выделить еще два характерных различия между рассматриваемыми технологиями. Правда, они не связаны с понятийным аппаратом теории телетрафика. Для пучка СЛ между концентратором и местной станцией рассчитывается требуемое число каналов – V . Как правило, $V >> 1$. IP тракт на участке МАК – маршрутизатор с точки зрения теории телетрафика представляет собой однолинейную систему, то есть $V = 1$. Пучок СЛ работает как система с потерями [33, 34]. IP тракт следует рассматривать как систему с ожиданием [37]. Более того, в пакетных сетях часто используются алгоритмы обслуживания с приоритетами [38].

Качество обслуживания на практике часто рассматривают с двух точек зрения, что не противоречит подходу, изложенному в рекомендации МСЭ Е.800 [6]. Во-первых, можно выделить показатели качества обслуживания вызовов. К ним относятся потери вызовов, задержки на этапах установления соединения и другие показатели. Во-вторых, следует определить показатели качества обмена информации. Для телефонной связи существенны уровень громкости, разборчивость речи, характеристики помех и ряд других атрибутов.

Для технологий коммутации каналов эти две группы показателей можно считать независимыми. Действительно, соединения могут устанавливаться быстро, вероятность потери близка к нулю, а качество связи из-за высоких помех в разговорном тракте оставаться крайне низким. Возможна и противоположная картина. Большинство вызовов теряется, соединения устанавливаются медленно, но все тракты обмена информацией обеспечивают очень комфортный разговор. В пакетных сетях обе группы качественных показателей тесно связаны между собой. При повышении доли потерянных IP-пакетов качество телефонного разговора заметно снижается. Рост задержки IP-пакетов также ведет к ухудшению качества телефонной связи.

Наконец, следует подчеркнуть еще одну важную особенность оценки трафика в IP сетях. Применение технологии "коммутация пакетов" для обслуживания трафика речи связано с внесением дополнительной задержки – ΔT в тракт обмена информацией между терминалами пользователей. Известно, что для комфортного телефонного разговора время задержки сигнала не должно превышать некоторую величину – T_R. Желательно, чтобы эта величина была равна 150 мс. В сети с коммутацией каналов задержка процесса передачи информации определяется двумя величинами:

- временем распространения сигнала – T_P;
- суммарной длительностью пребывания сигнала во всех МС и транзитных узлах, которые использованы для организации связи между терминалами пользователей, – T_S.

Разницу $T_R - (T_P + T_S)$ целесообразно рассматривать как запас [8], который можно использовать без ущерба для качества телефонной связи. Очевидно, что величина ΔT определяется следующим неравенством:

$$\Delta T \le T_R - (T_P + T_S). \qquad (1.8)$$

В терминах теории управления запасами [8] ТФОП целесообразно рассматривать как систему, для исследования которой подходит *однопродуктовая модель*. Для каждого сеанса связи запас – это время, то есть невосполнимый продукт. Это означает, что интенсивность поставок равна нулю [8]. Интенсивность спроса целесообразно определить для типичных соединений между терминалами с учетом величин T_P и T_S. Для каждого типового соединения задано среднее значение T_P, которое можно считать постоянным (дисперсия этой величины практически равна нулю). Тогда оценка допустимой величины ΔT требует исследования характеристик случайной величины T_S.

Для Операторов связи ошибки в подобных исследованиях могут носить фатальный характер. Они ведут к потере клиентов, что подтверждается практикой [47]. Основная проблема заключается в том, что "потерянное" время нельзя компенсировать. С этой точки зрения ошибки, которые ведут к искажению сигнала (в разумных пределах) или к чрезмерному затуханию, не представляются столь критичными. Они могут – хотя бы частично – устраняться за счет применения более совершенных алгоритмов обработки сигналов и их усиления.

1.4.5. Прогнозирование требований к телекоммуникационной сети

В процессе планирования телекоммуникационных сетей приходится сталкиваться с различными задачами прогнозирования. Применительно к телефонной связи важными прогностическими оценками считаются численность потенциальных абонентов в каждом пристанционном участке и параметры трафика. Следует подчеркнуть, что для тех задач, которые касаются проектирования сети доступа, не столь существенны детализированные параметры трафика – доли международной, междугородной и местной нагрузки, а также удельный вес вызовов, относящихся к дополнительным видам услуг. Если рассматривать задачи, касающиеся проектирования междугородной сети, то оценки одноименной доли трафика становятся очень важными. Для расчета ожидаемых доходов Оператору ТФОП важно знать прогнозы, касающихся всех видов нагрузки.

В пределах ТФОП используются каналы *тональной частоты* (ТЧ) либо *основные цифровые каналы* (ОЦК). Это означает, что по прогнозируемой численности абонентов ТФОП легко определяются требования к пропускной способности транспортной сети.

Для перспективных телекоммуникационных сетей ряд задач прогнозирования существенно усложняется. Характерен пример, касающийся Internet. Для проектирования сети доступа необходимо знать не только численность пользователей Internet, но и их распределение с точки зрения скорости обмена данными. Если пользователь обращается в Internet при помощи оборудования xDSL, то принципы расчета транспортных ресурсов заметно отличаются от использованной ранее практики расчета сетей доступа [48].

Прогнозирование обычно выполняется для инфокоммуникационной системы в целом. Для отдельных элементов телефонной сети используется только часть полученных результатов. Процессы консолидации, интеграции и конвергенции в электросвязи привели к тому, что при проектировании любого элемента современной телекоммуникационной сети нужны прогностические оценки для инфокоммуникационной системы в целом. По этой причине задачи прогнозирования целесообразно рассматривать в полном объеме – с точки зрения выбора сценария, проектирования, построения, эксплуатации и развития инфокоммуникационной системы. Интересный подход к прогнозированию и практически значимые результаты были приведены в работах [49, 50], опубликованных в 1995 году. На основе этих работ в [51] был предложен простой метод прогнозирования, использующий результаты, которые получены для инфокоммуникационных систем в развитых странах, в качестве аналога. В [52] перечислены модели и методы прогнозирования, которые полезны для решения задач, важных для инфокоммуникационной системы:

- диффузионная модель;
- регрессионная модель;
- эконометрическая модель;
- метод ARIMA [53];
- модель, использующая фильтр Калмана [54];
- метод сглаживания.

Подобные модели и методы применяются в тех случаях, когда известна предыстория исследуемого процесса. В противном случае задача прогнозирования усложняется. Для прогнозирования процессов, касающихся новых инфокоммуникационных технологий и услуг, необходимо использовать иные экономико-математические методы. В настоящее время большинство прогнозов разрабатывается при помощи методов экстраполяции и экспертных оценок [9]. Каждый из этих двух методов реализуется разными способами, выбор которых зависит от исследуемого процесса и поставленной задачи. Повышение достоверности полученных результатов в ряде случаев достигается за счет объединения разных способов прогнозирования.

Усложнение разработки прогнозов – помимо отмеченных в параграфе 1.4.1 проблем с достоверностью статистической информации – объясняется такими обстоятельствами:

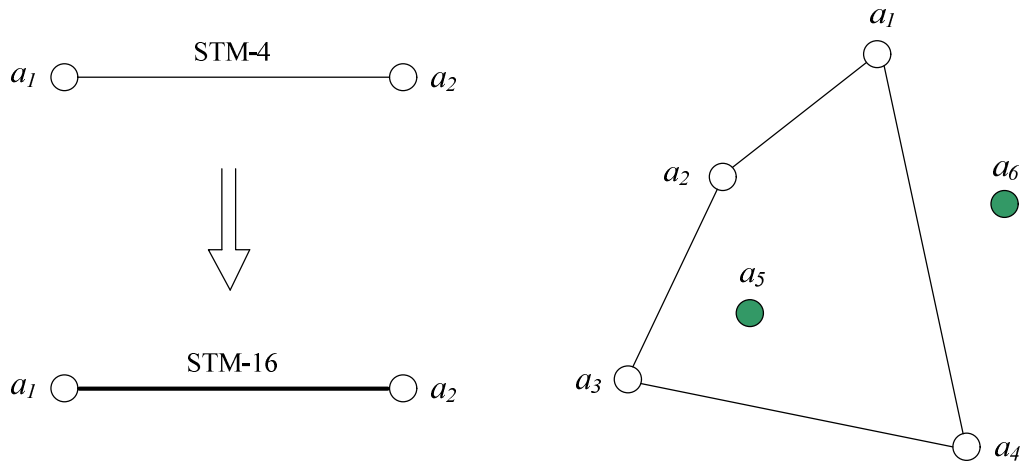
- некоторые виды новых услуг столь специфичны, что для их прогнозирования очень сложно подобрать адекватные аналоги;

- ряду сегментов российского инфокоммуникационного рынка (характерный пример – мобильная связь) свойственны процессы развития, существенно отличающиеся от тенденций, которые тщательно изучены в других странах.

Подобные причины стимулируют совершенствование методов прогнозирования. Вместе с тем, полезно переосмыслить цель прогнозирования. В частности, для некоторых задач не требуется высокая точность результатов. На сленге прогнозистов для подобных задач придуман девиз: "Попасть в порядок". Например, у Оператора возникает вопрос: "Какой тракт следует организовать между двумя узлами транспортной сети – STM-1, STM-4 или STM-16?". Отношения пропускных способностей перечисленных трактов образуют ряд: 1, 4, 16. Очевидно, требования к точности метода прогнозирования не должны быть столь же жесткими, как к достоверности результатов для транспортных сетей, которые построены на базе многопарных кабелей. Причина заключается в том, что различие между количеством проводников в некоторых типах многопарного кабеля оценивается не разами, а процентами.

С другой стороны, для ряда задач требования к точности прогнозов повышаются. В частности, для некоторых групп пользователей формируется спрос на предоставление очень большой полосы пропускания на уровне сети доступа. Один из характерных примеров – предоставление услуг телевидения высокой четкости (ТВЧ), более известного по аббревиатуре HDTV (High Definition Television). Каждому такому терминалу должна быть предоставлена скорость передачи информации порядка 20 Мбит/с. Для обычной телефонной связи определена скорость передачи 64 кбит/с, то есть в 300 раз меньше. Кроме того, 300 каналов в телефонной сети обычно используются совместно, как минимум, двумя тысячами абонентов. Тогда справедлива такая трактовка: при расчете пропускной способности транспортной сети ошибка прогнозирования в 2000 абонентов телефонной сети и в одном пользователе услуг HDTV будет идентичной.

При анализе результатов прогнозирования целесообразно учитывать возможность исправления ошибок. Это утверждение целесообразно прокомментировать на примере двух задач прогнозирования – рисунок 1.28.



а) Повышение пропускной способности линии передачи в транспортной сети

б) Появление двух новых СУ в составе транспортной сети

Рисунок 1.28. Возможность исправления ошибок прогнозирования

Первый прогноз – оценка пропускной способности линии передачи на базе кабеля с ОВ. Допустим, что в соответствии с прогнозом все ОВ между СУ1 и СУ2 надо уплотнить системой передачи STM-4. После реализации проекта выяснилось, что необходимо существенно повысить пропускную способность линии передачи. Тогда Оператор может заменить эксплуатируемое оборудование системой STM-16 (как показано в левой части рисунка 1.28) и/или установить аппаратуру компактного спектрального уплотнения (DWDM).

Конечно, подобная ошибка прогнозирования влечет за собой дополнительные издержки Оператора. Они, как правило, не столь существенны и не связаны с решением сложных организационных вопросов.

Второй прогноз также касается транспортной сети. Соответствующий граф показан в правой части рисунка 1.28. Он содержит четыре вершины: a_1, a_2, a_3 и a_4. Допустим, при проектировании кольца SDH не была учтена возможность появления двух новых СУ – изолированные вершины графа: a_5 и a_6. Построенное кольцо включало только четыре СУ, для соединения которых был проведен весь комплекс соответствующих работ (вскрытие дорожных покрытий, прокладка кабельной канализации и так далее). Что делать с подключением двух новых СУ, появление которых (например, вследствие строительства нового микрорайона и крупного делового центра) не было учтено при прогнозировании численности потенциальных клиентов Оператора? Для подключения двух новых узлов в эксплуатируемое кольцо придется провести ряд дорогостоящих и сложных с организационной точки зрения операций. В подобных случаях возникающие перед Оператором задачи могут потребовать значительных инвестиций. Не исключено также возникновение дополнительных проблем, касающихся строительных работ.

К задачам прогнозирования мы вернемся во второй и третьей главах монографии. Ряд вопросов рассматривается в четвертом Приложении.

1.4.6. Аспекты принятия решения

Процесс принятия решения постоянно усложняется из-за факторов, отражающих изменения экономических, социальных и технических аспектов функционирования национальной инфокоммуникационной системы. Поэтому радикально меняются задачи, решаемые ЛОР и ЛПР. Можно утверждать, что перед ЛОР возникает ряд качественно новых задач, а риск, порождаемый потенциальными ошибками ЛПР, заметно возрастает.

Большинство задач, стоящих перед ЛОР и ЛПР, нельзя считать качественно новыми. Тем не менее, следует выделить два направления, которым еще недавно не уделялось должного внимания в силу природы централизованной модели экономики. Речь идет о конкурентоспособности и анализе рисков. Эти два направления тесно связаны друг с другом. Рассмотрим графики, представленные на рисунке 1.29. Три кривые чистой текущей стоимости (NPV), показанные на этом рисунке, заимствованы из [55]. Они иллюстрируют возможные решения Оператора по развитию инфокоммуникационного бизнеса.

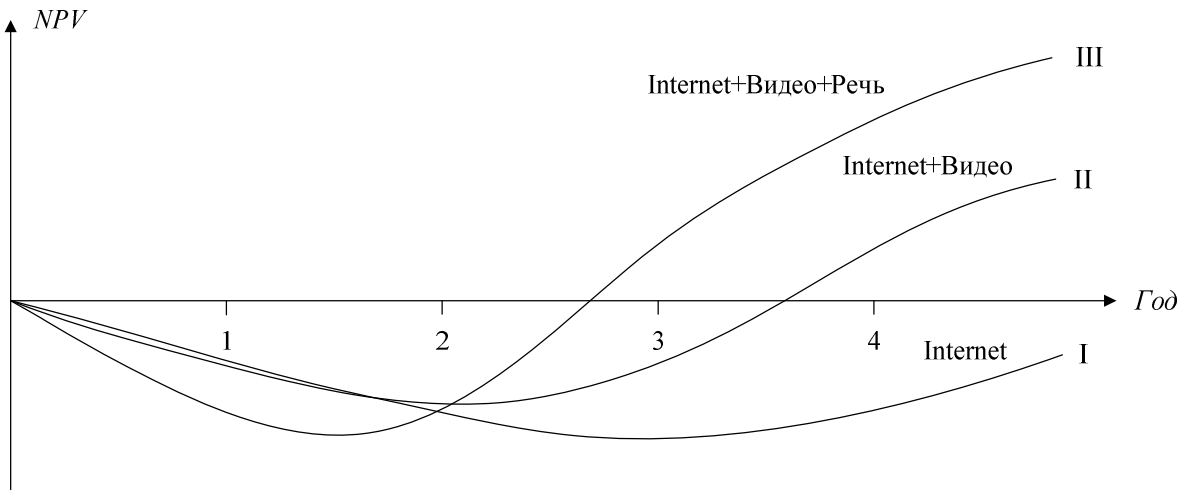


Рисунок 1.29. Три стратегии развития инфокоммуникационного бизнеса

Стратегия I ориентирована на один вид деятельности – поддержку услуг Internet. Судя по характеру кривой, в течение пяти лет инвестиции Оператора не окупятся. Следует

заметить, что в некоторых проектах срок окупаемости устанавливается инвестором. Предположим, что максимальный срок окупаемости установлен на уровне 4 лет. Это означает, что стратегия I не может быть принята. Подобный вывод – характерный пример принятия предварительных решений при планировании сети.

Если Оператор будет предоставлять услуги Internet и видеоинформации (стратегия II), то примерно за три с половиной года вложенные средства окупятся. В дальнейшем доходы Оператора будут превышать издержки. Стратегия III, которая предусматривает еще и обслуживание трафика речи, обещает возврат инвестиций менее чем за три года. Более того, доходы Оператора становятся максимальными.

На первый взгляд, Оператору следует выбрать стратегию III, но на практике задача обычно не так проста. Прежде всего, необходимо учитывать конкуренцию на рынке инфокоммуникационных услуг. Один из методов проведения соответствующего анализа – построение многоугольников конкурентоспособности [56]. Оцениваемые показатели должны быть представлены нормированными величинами, которые могут принимать любые значения на отрезке $[0,1]$. Тогда любой многоугольник конкурентоспособности может быть размещен в границах окружности с единичным радиусом. Для любого показателя W_j справедливо следующее неравенство:

$$0 \le W_j \le 1. \qquad (1.9)$$

Пример построения многоугольника конкурентоспособности для ряда показателей развития инфокоммуникационной системы иллюстрируется рисунком 1.30. Внешний многоугольник, имеющий форму квадрата, определяет экстремальные значения для всех показателей. Заштрихованный многоугольник образуется путем соединения всех точек W_j. Эти точки определяют анализируемые показатели инфокоммуникационной системы. Чем ближе величина W_j к единице, тем лучше $j-ый$ показатель инфокоммуникационной системы.

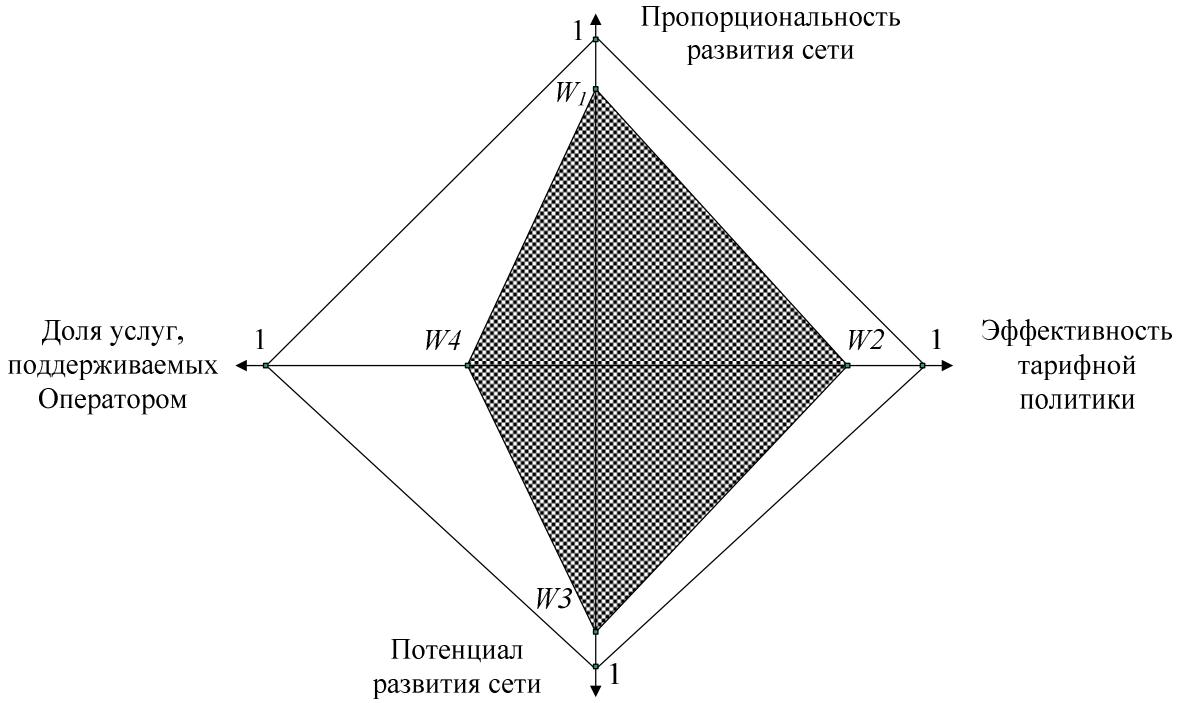


Рисунок 1.30. Пример построения многоугольника конкурентоспособности

При оценке конкурентоспособности обычно сравнивают несколько вариантов, которым соответствуют многоугольники с разной площадью. Лучшим вариантом считается тот, для которого площадь многоугольника максимальна. Для выбранного примера пло-

щадь построенного многоугольника можно сравнивать с уровнем $S_{MAX} = 2$. Это объясняется тем, что площадь внешней фигуры (идеальные условия для развития инфокоммуникационной системы) равна двум. Для вычисления площади внутреннего многоугольника – S_0 использованы простые геометрические соотношения:

$$S_0 = 0,5(W_1 + W_3)(W_2 + W_4). \qquad (1.10)$$

Величина S_0 представляет интерес как численная оценка совокупности проблем, с которыми сталкиваются участники инфокоммуникационного рынка. Оценки вида $(1 - W_j)$ и $(1 - W_j)^2$ могут оказаться полезными с точки зрения выбора приоритетных направлений для модернизации телекоммуникационной сети.

Классический метод анализа многоугольников конкурентоспособности заключается в сравнении средних значений исследуемых показателей функционирования системы или сети. Этот метод целесообразно дополнить важной характеристикой всех исследуемых показателей – дисперсией их оценок. При наличии достоверных данных целесообразно анализировать также и размах распределения. На рисунке 1.31 показаны многоугольники конкурентоспособности, для которых оцениваются четыре параметра, обозначенные как W_{ij}. Для первого многоугольника существенный разброс свойственен параметру W_{12}, а для второго – W_{24}. Все линии, которые инцидентны соответствующим вершинам обоих многоугольников, изображены пунктиром.

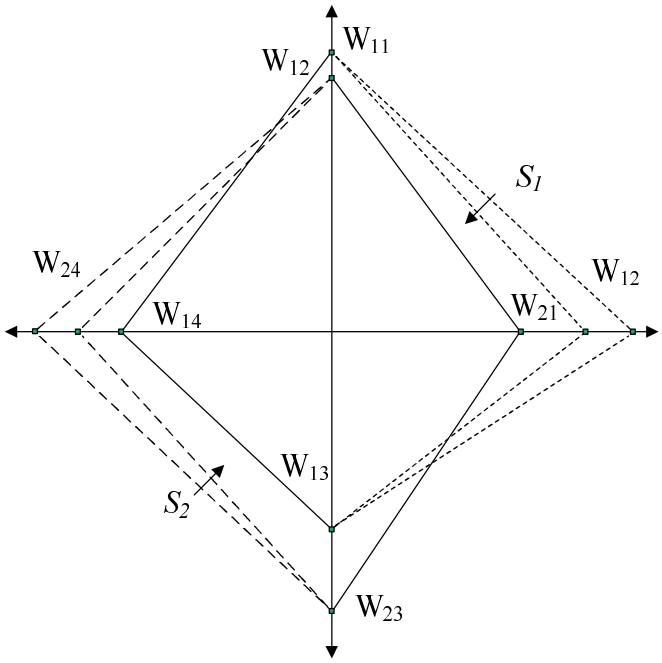


Рисунок. 1.31. Многоугольники конкурентоспособности,
построенные с учетом разброса исследуемых показателей

В результате анализа сценариев развития инфокоммуникационной системы, которые образуют конечное множество I, выбирается решение – $r \in I$. Для решения r площадь многоугольника – P_r будет максимальной:

$$P_r = \max_I (S_i). \qquad (1.11)$$

Для ряда показателей (W_{12} и W_{24} на рисунке 1.31), которые могут варьироваться, целесообразно определять размах – R_{ij} и дисперсию – σ_{ij}^2. Площадь многоугольников долж-

на вычисляться с учетом размаха R_{ij}. Это означает, что для $i-го$ многоугольника целесообразно вычислить несколько значений – S_{iq}. Для примера, показанного на рисунке 1.31, $q=2$. Ранжирование значений S_{iq} может привести к тому, что критерий (1.11) не будет полезным. В частности, при $S_{11}<S_{22}<S_{21}<S_{12}$ сложно определить предпочтения следующих видов:

$$S_1 \succ S_2, \quad S_2 \succ S_1. \tag{1.12}$$

Выбор должен быть сделан ЛПР. Для упрощения принятия решения целесообразно – в дополнение к определению значений S_i – вычислить дисперсию исследуемой величины – σ_i^2, учитывая все оцениваемые показатели, которые образуют множество J:

$$\sigma_i^2 = \sum_J \sigma_{ij}^2. \tag{1.13}$$

При равенстве или близости величин S_i предпочтительнее становится тот сценарий, для которого характерна минимальная дисперсия оцениваемого показателя – D_r:

$$D_r = \min_I(\sigma_i^2). \tag{1.14}$$

Кроме построения многоугольников конкурентоспособности анализ вариантов развития инфокоммуникационной системы может быть основан на экспертных оценках. Эти два подхода целесообразно использовать совместно.

Построение многоугольников конкурентоспособности можно считать простейшим способом решения оптимизационной задачи. Достоинства этого способа заключаются в простоте и наглядности. На самом деле планирование телекоммуникационной сети следует отнести к классу задач многокритериальной (векторной) оптимизации [57].

Уровень конкурентоспособности – только один из факторов, который учитывается при принятии решения. Весьма важным стал также анализ рисков [58, 59]. Теория риска обычно рассматривается как раздел теории вероятностей, который посвящен принятию решений в условиях неопределенности. Считается, что неопределенность подчиняется вероятностным законам.

В качестве меры риска ранее широко использовалось математическое ожидание случайной величины с некой ФР – $F(x)$, которая определяет поведение исследуемого процесса. Известно, что среднее значение не дает исчерпывающего представления о случайной величине. В последнее время – в дополнение к математическому ожиданию – стали использоваться и другие меры риска, среди которых следует выделить дисперсию и полезность. Дисперсия в сочетании с математическим ожиданием позволяет лучше понять природу случайной величины, что известно из курса теории вероятностей [8]. Мера, касающаяся полезности, была предложена в процессе разработки одноименной теории [60]. В теории полезности были разработаны различные меры риска, позволяющие учитывать специфические особенности исследуемых экономико-математических моделей.

Анализ конкурентоспособности и риска можно рассматривать как частные задачи теории принятия решений [8, 61, 62], которая служит общим инструментом для ЛОР и ЛПР. Дело в том, что решение принимается не только в условиях риска и конкурентной борьбы – конфликта или противодействия в терминах теории принятия решений. Весьма существенный фактор – влияние неопределенности разного рода. Причины этих видов неопределенности могут лежать вне области влияния риска и конкурентной борьбы.

Все изложенные выше соображения свидетельствуют о существенном усложнении процесса принятия решений. Следует подчеркнуть еще одно обстоятельство. Все задачи, рассмотренные в предыдущих параграфах, нужно решать, учитывая основные требования к перспективным телекоммуникационным сетям. Если анализ телекоммуникационной сети в целом провести нельзя, то целесообразно использовать искусственные приемы, поз-

воляющие построить абстрактную модель, которая будет близка к рассматриваемой системе. Один из способов построения такой модели изложен в параграфе 1.5.2.

Ubi concordia, ubi victiria.
(Где согласие, там и победа)

1.5. Комментарии к первой главе

1.5.1. Модель инфокоммуникационной системы

В отечественной и в зарубежной научно-технической литературе часто используется модель инфокоммуникационной системы, разработанная МСЭ. Она состоит их четырех основных компонентов – рисунок 1.32. В тех рекомендациях, которые разрабатывались МСЭ для GII (глобальной информационной инфраструктуры), третий слева компонент называется базовой сетью. В ряде монографий и статей он именуется транспортной или транзитной сетью.

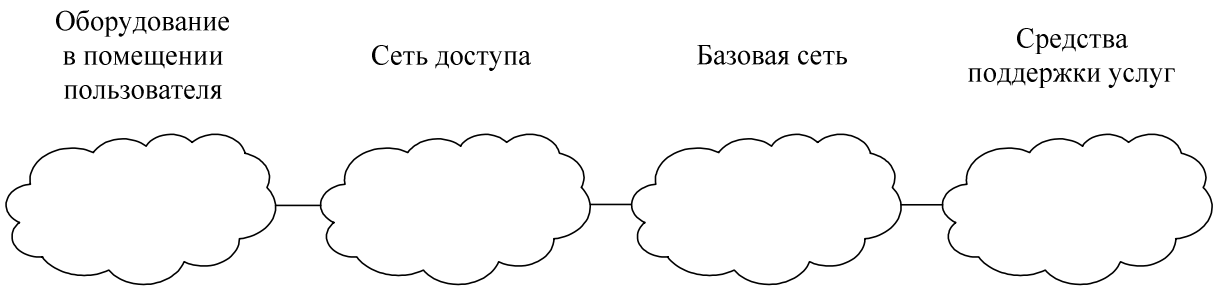


Рисунок 1.32. Модель инфокоммуникационной системы

Изменение терминологии объясняется двумя причинами. Во-первых, прилагательное "базовая" лучше (по крайней мере, чем "транспортная") отражает основные функции данного компонента модели. Транспортные функции, строго говоря, выполняются всеми четырьмя компонентами. Во-вторых, в тексте рекомендаций МСЭ, которые относятся к цифровым системам передачи, вводится термин "транспортная сеть", смысл которого пояснялся при помощи рисунков 1.4 и 1.21. Он связан с функциональным, а вовсе не с иерархическим делением телекоммуникационных сетей.

Таким образом, термин "транспортная сеть" некоторое время использовался для двух компонентов инфокоммуникационной системы, выделенных с использованием разных таксонов – классификационных признаков. Такое терминологическое несоответствие не следует тиражировать. Словосочетание "базовая сеть" (Core Network) можно считать компромиссным решением. Прилагательное "базовая" не подчеркивает функции сети, но отражает ее место в инфокоммуникационной системе. Особенно если используется иной вариант перевода термина "Core Network": ядро сети. Немаловажный аргумент в пользу этого термина – его использование в новых рекомендациях МСЭ серии Y.

Целесообразно остановиться еще на одном терминологическом казусе. В тексте этой главы уже упоминались термины, которые являются синонимами:

- первичная сеть и транспортная сеть;
- вторичная сеть и коммутируемая сеть.

Принципы декомпозиции системы связи на единую первичную (транспортную – transport) и совокупность вторичных (коммутируемых – switched) сетей была предложена отечественными специалистами [15]. *Позже* такой подход был предложен в зарубежных публикациях. В отечественную техническую литературу пришли термины транспортная и коммутируемая сети. Поэтому некоторым специалистам (особенно тем, кто недавно стал заниматься проблемами инфокоммуникаций) термины *первичная сеть* и *вторичная сеть* не знакомы.

Для североамериканской ТФОП используется своя терминология. Прилагательные "первичная" и "вторичная" указывают на уровни иерархии ТФОП. Кроме того, цифры от "1" до "5" определяют класс коммутационной станции, который соответствует уровню иерархии ТФОП. В одной монографии приведена трактовка терминов "первичная сеть" и "вторичная сеть", основанная на переводе материалов, которые посвящены принципам построения североамериканской ТФОП. Авторы упомянутой работы невольно вводят читателей в заблуждение. Никогда слова "первичная" или "вторичная" не использовались в отечественной технической литературе для указания на уровень сетевой иерархии.

1.5.2. "Условная" телекоммуникационная сеть

В большинстве случаев процесс модернизации инфокоммуникационной системы не может быть выполнен одномоментно. Это означает, что в течение некоторого времени в составе инфокоммуникационной системы эксплуатируется оборудование с разными функциональными возможностями. На рисунке 1.33 приведен простейший пример такой ситуации для местной телефонной сети, состоящей из четырех аналоговых МС. На первом этапе модернизации сети вместо аналоговых МС1 и МС2 устанавливается одна цифровая коммутационная станция с тремя выносными концентраторами.

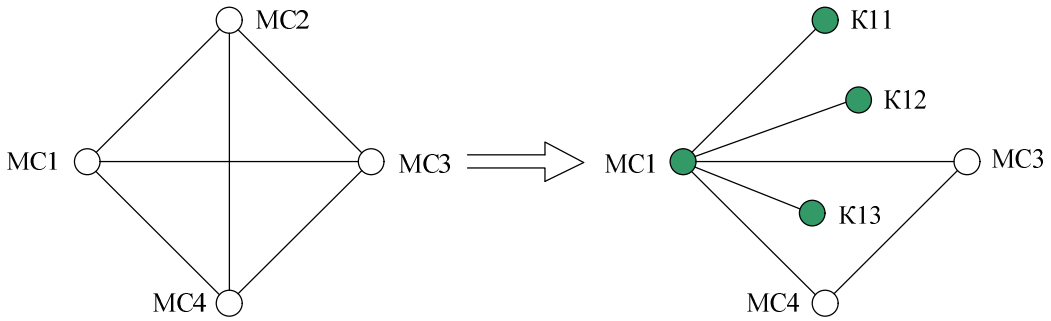


Рисунок 1.33. Первый этап модернизации аналоговой ГТС

С технической точки зрения модель, изображенная в правой части рисунка 1.33, может считаться приемлемой, так как отражает все основные изменения в структуре телефонной сети. Для анализа рисков, характера кривых *NPV* и других атрибутов, которые существенны с точки зрения выбора стратегии модернизации, предложенная модель не представляется эффективной. Необходимо знать конечную цель модернизации сети, определение которой не может быть выполнено с высокой достоверностью.

Для решения ряда задач может использоваться подход, который основан на модели *"условной"* телекоммуникационной сети. Под "условной" сетью будем понимать некий "черный ящик", свойства которого определяются применительно к конкретной задаче. Один из возможных примеров показан на рисунке 1.34.

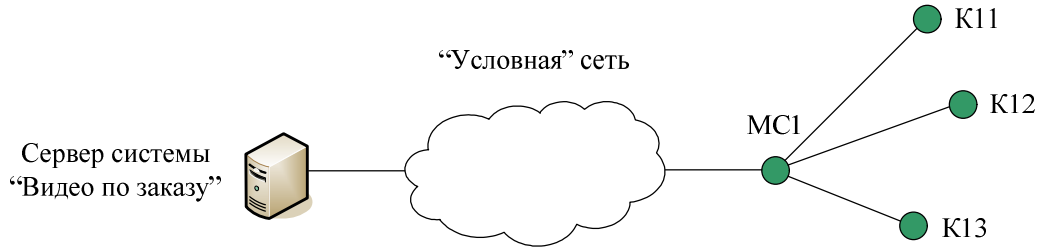


Рисунок 1.34. Пример "условной" телекоммуникационной сети

Если оценивается эффективность выбранного сценария модернизации телефонной сети с точки зрения поддержки услуги "Видео по заказу", то совокупность технических средств, которые обеспечивают доступ абонентов в сервер соответствующей системы,

представляется в виде "условной" сети. Структура облака, служащего моделью "условной" сети, как правило, не детализируется. Необходимо лишь оценить стоимость обмена информацией через "условную" сеть.

Модели, подобные "условной" телекоммуникационной сети, нашли применение при проведении экономических исследований. В частности, стоимостные характеристики для некоторых видов эксплуатируемого оборудования установить невозможно. В модели их можно заменить современными устройствами, выполняющими аналогичные функции. Такой подход позволяет решить некоторые задачи, касающиеся анализа экономических характеристик инфокоммуникационных систем и их элементов.

1.5.3. Сценарный подход к развитию инфокоммуникационной системы

Под сценарием, как правило, понимается последовательность целенаправленных операций, которая осуществляется в пространственно-временных координатах. Интерес к анализу эволюции сложных систем на базе сценарного подхода постоянно возрастает [63, 64]. Сценарий (*scenario*), как правило, позволяет с достаточной степенью детализации представить вероятное развитие исследуемой модели.

Обычно сценарий отражает процессы, основанные на стратегии. Сценариям, как правило, свойственны существенные различия. Каждый сценарий, в свою очередь, может быть реализован за счет использования нескольких вариантов. Обычно вариантам не свойственны качественные различия.

Косвенными доказательствами эффективности сценарного подхода к исследованию путей развития инфокоммуникационной системы могут служить известные ошибочные прогнозы. В 1943 году Томас Уотсон, президент компании IBM, высказал следующую мысль: "Я думаю, что объем мирового рынка компьютеров составит пять штук". Кен Олсон, основатель фирмы Digital Equipment Corporation, в 1977 году утверждал следующее: "Нет никаких причин, чтобы кто-нибудь захотел установить компьютер у себя дома". Наконец, в 1981 году Билл Гейтс, основатель корпорации Microsoft, произнес такие слова: "Память объемом 640К достаточна для всех".

В недавнем прошлом можно найти схожие утверждения. Достаточно вспомнить те прогнозы российского рынка мобильной связи, которые были опубликованы в конце прошлого века. Предполагалось, что к 2010 году емкость сетей мобильной связи составит около 10 миллионов терминалов.

Сценарный подход позволяет избежать существенных ошибок при выборе основных направлений развития сложной системы. Не следует ожидать, что разработка сценариев позволит выбрать оптимальные решения на всем *жизненном цикле* сложной системы. Задачи сценарного подхода скромнее. Они демпфируют ряд просчетов за счет подхода, который формулируется в виде следующего постулата: "Что оптимально сегодня, может оказаться малоэффективным завтра".

Сценарный подход иногда рассматривается как наличие нескольких точек зрения по одному вопросу. Сценарии могут разрабатываться на разные периоды времени. В этом заключается их формальное сходство с прогнозами. Многие специалисты подчеркивают различие между сценариями и прогнозами. С другой стороны, разработка прогнозов, для которых рассматривается пессимистическое, прагматическое и оптимистическое развитие исследуемого процесса, очень похожа на задачу выбора одного из трех одноименных сценариев.

Примером применения сценарного подхода может служить модель транспортной сети, которая была показана в правой части рисунка 1.28. Предположим, что у Оператора связи есть твердая уверенность (и соответствующее технико-экономическое обоснование) в том, что необходимо создать четыре СУ – a_1, a_2, a_3 и a_4. Относительно двух СУ, которые обозначены как a_5 и a_6, существуют соображения об их вероятном появлении к некому моменту времени t_f. Создание транспортной сети начинается в момент времени t_0.

Все шесть вершин соответствующего графа показаны в левой части рисунка 1.35. Они окрашены разным цветом, чтобы различать два набора СУ.

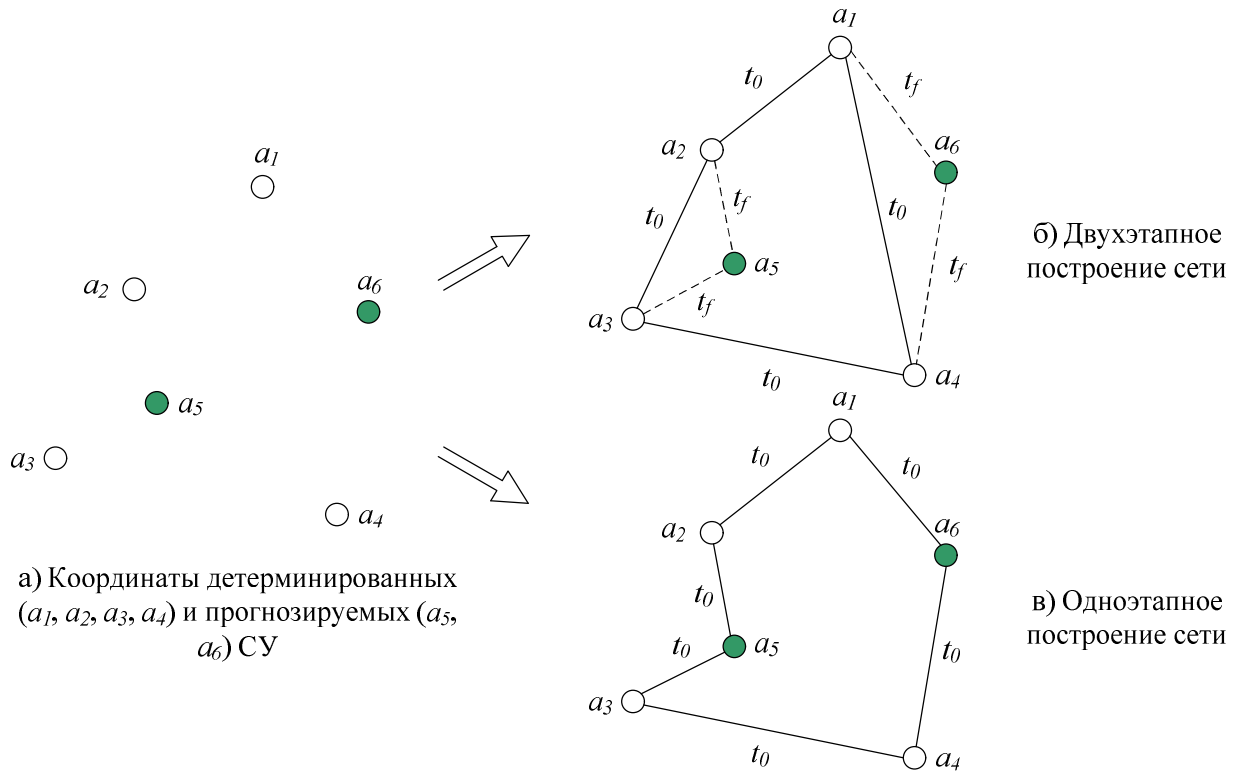


Рисунок 1.35. Два сценария построения транспортной сети

В правой части рисунка 1.35 изображены два возможных сценария по реализации рассматриваемого проекта. Первый сценарий базируется на двухэтапном построении транспортной сети. Структура создаваемого кольца показана сплошными линиями. Рядом с каждой линией указан момент времени t_0, в который она строится. На первом этапе реализации проекта объединяются те четыре СУ, появление которых предопределено технико-экономическим обоснованием, выполненным для момента времени t_0. Затраты Оператора к моменту времени t_0 обозначены как $I(t_0)$.

К моменту времени t_f с некоторой вероятностью – p_f возникает необходимость в подключении двух СУ: a_5 и a_6. Для надежности эти СУ должны подключаться к кольцу двумя линиями передачи. Их возможные трассы показаны пунктирными линиями, рядом с которыми указан момент времени t_f. Соответствующие затраты Оператора обозначены как $I(t_f)$. Суммарные затраты Оператора нельзя оценивать суммой $I(t_0)+I(t_f)$ с учетом законов экономики [12, 13]. Далее суммарные затраты Оператора на построение сети, состоящей из шести СУ, обозначены как $I(t_0+t_f)$.

При выборе второго сценария транспортная сеть объединяет все шесть СУ. По этой причине рядом со всеми линиями передачи указан момент времени t_0. Следует учесть, что существует возможность размещения незначительной части оборудования в СУ, которые расположены в вершинах a_5 и a_6. В любом случае затраты Оператора на реализацию второго сценария – $I^*(t_0)$ будут превосходить величину $I(t_0)$. С другой стороны, можно утверждать, что $I^*(t_0)<I(t_0+t_f)$, но при условии, что СУ в точках a_5 и a_6 действительно понадобятся. В противном случае суммарные затраты Оператора на построение сети будут определяться величиной $I(t_0)$.

Для анализа преимуществ и недостатков обоих сценариев существенен уровень вероятности p_f. Опуская разбор вариантов, которые могут быть реализованы для каждого сценария, целесообразно сформулировать важный вывод. Следует стремиться к выбору сценария, который отличается *максимальной устойчивостью* к изменению ситуации на практике. Это изменение в рассматриваемом примере задано вероятностью p_f, так как иная оценка возможного развития событий не представляется возможной. К моменту t_f для ожидаемого события возможны два взаимоисключающих исхода. Это означает, что величина p_f в технико-экономических расчетах становится либо нулем, либо единицей. Если затраты Оператора и при $p_f \equiv 0$, и при $p_f \equiv 1$ различаются не столь существенно, то выбранному сценарию свойственна высокая инвариантность к изменяющимся внешним и внутренним условиям.

Методологический подход к решению рассматриваемой задачи изложен в [65]. Эта работа основана на поиске *рационального решения*, направленного на выбор сценария, которому в предыдущем абзаце соответствовали слова "максимальная устойчивость". В [65] рассматривается модель сети, в которой может появиться несколько новых узлов. Каждому такому узлу соответствует своя вероятность практической реализации. Модель сети, показанная на рисунке 1.36, похожа на ряд примеров, которые анализировались в этом разделе монографии. Структура модернизируемой сети представляет собой кольцо, объединяющее четыре СУ. Это кольцо показано в левой части модели.

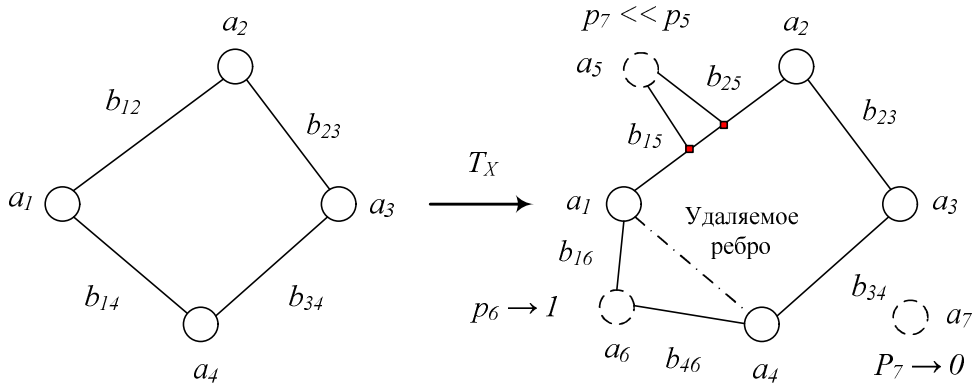


Рисунок 1.36. Модели структуры эксплуатируемой и планируемой сети

В правой части изображена модель сети, которая будет создана через время T_X. При разработке модели сети на период времени T_X используются три предположения:

I. С вероятностью, близкой к единице, в графе появится новая вершина a_6. Если кабель между узлами a_1 и a_4 подлежит замене при модернизации сети, то ребро графа между вершинами a_1 и a_4 удаляется. Вместо него проектируется новый маршрут: $a_1 - a_6 - a_4$, состоящий из ребер b_{16} и b_{46}. Далее рассматривается именно такой случай. Если кабель между узлами a_1 и a_4 отвечает всем необходимым требованиям, то он остается в эксплуатации. Тогда ребра b_{16} и b_{46} следует рассматривать как средства включения новой вершины a_6. Модель транспортной сети в этом случае будет состоять из двух колец.

II. Вероятность появления вершины $a_7 - p_7$ близка к нулю. Следовательно, даже если кабель между третьим и четвертым узлами сети (ребра b_{34} между вершинами a_3 и a_4) необходимо заменить, то нет смысла менять трассу. Тогда можно использовать уже имеющуюся кабельную канализацию, если ее состояние удовлетворяет требованиям на обозримую перспективу. Подобное утверждение справедливо, если достаточно только проложить новый кабель.

III. Вершина a_5 появится с вероятностью p_5, которая далека от единицы, но много больше p_7. Возможное решение – выделить два пункта (они показаны квадратиками на ребре между вершинами a_1 и a_2), посредством которых позднее будут созданы две трассы к вершине a_5 для формирования кольца.

Места размещения вершин a_5, a_6 и a_7 могут быть заданы не координатами точек, а некими областями S_5, S_6 и S_7. Каждая область S_i $(i=\overline{5,7})$ определяет границы территории для размещения узла сети.

При такой постановке задачи неуместно говорить о поиске оптимального решения. Целесообразно определить задачу проектирования сети как поиск рационального решения по ее развитию за период времени T_X. В любом случае следует установить критерий выбора структуры сети.

Для определения критерия *рациональности* структуры сети целесообразно ввести функцию стоимости $F(x_1, x_2,..., x_m, y_1, y_2,..., y_n)$. Предположим, что все параметры вида x_i $(i=\overline{1,m})$ относятся к ключевым переменным, то есть они весьма существенно влияют на поведение функции стоимости сети. Параметры вида y_i $(i=\overline{1,n})$ не относятся к ключевым переменным. Предположим далее, что задана область допустимых – с точки зрения выбора структуры сети – значений функции стоимости: ψ_{min} и ψ_{max}. Пусть для каждого из ключевых параметров также определена область возможных изменений: x_i^{min} и x_i^{max}. Условие существования *рационального решения* можно сформулировать в следующем виде:

$$F(x_1^{min}, x_2^{min},..., x_m^{min}, y_1, y_2,..., y_n) \geq \psi_{min}, \tag{1.15}$$

$$F(x_1^{max}, x_2^{max},..., x_m^{max}, y_1, y_2,..., y_n) \leq \psi_{max}. \tag{1.16}$$

Для большинства функций вида $F(x_1, x_2,..., x_m, y_1, y_2,..., y_n)$ можно ограничиться одним из этих условий. Например, если при помощи исследуемой функции оценивается доход Оператора связи, то уместно использовать только ограничение (1.15). Если функция $F(x_1, x_2,..., x_m, y_1, y_2,..., y_n)$ отражает изменение капитальных затрат, то целесообразно учитывать только ограничение (1.16).

В задачах проектирования сети связи обычно удается выделить один ключевой параметр – время, обозначаемый далее как t. Тогда можно оперировать функцией $F(t)$. Пусть изменения функции $F(t)$ происходят в моменты времени t_j. В диапазоне (t_j, t_{j+1}) значение функции $F(t)$ остается неизменным, равным A_j. Это означает, что функция $F(t)$ является ступенчатой. Ступенчатые функции полезны для исследования зависимости стоимости сети от производительности или пропускной способности оборудования.

Пример функции $F(t)$ приведен на рисунке 1.37 для семи моментов времени t_j. Предположим, что функция $F(t)$ отражает изменение удельной (в расчете на один порт) стоимости коммутационной станции. Тогда события, происходящие в моменты времени t_j, могут заключаться в расширении коммутационной станции или во введении новых функциональных возможностей. В первом случае удельная стоимость коммутационной станции снижается, а во втором повышается. Очевидно, что в рассматриваемом примере определение величины ψ_{min} не имеет практического смысла. С теоретической точки зрения корректная оценка ψ_{min} может оказаться полезной. Она позволяет обнаружить ошибки в расчетах, если функция стоимости становится ниже некого разумного предела. По этой причине на приведенном ниже графике показаны оба ограничения вида (1.15) и (1.16).

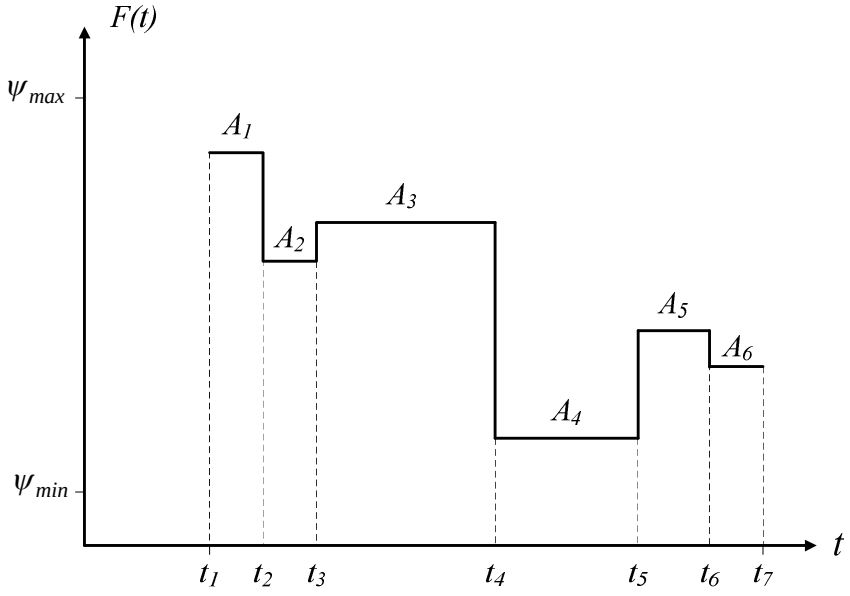


Рисунок 1.37. Пример функции $F(t)$

Для параметра t, как одного из элементов совокупности x_i, определены границы t^{min} и t^{max}. Очевидно, что $t_1 = t^{min}$ и $t_7 = t^{max}$. Максимальное значение функции $F(t)$ равно A_1, а минимальное – A_4. Судя по поведению функции $F(t)$, на отрезке (t^{min}, t^{max}) выполняются условия (1.15) и (1.16) существования рационального решения.

Ключевыми переменными x_i иногда могут быть параметры с вероятностями $p(x_i)$. В таких случаях величины ψ_{min} и ψ_{max} необходимо рассчитывать с учетом размаха распределений x_i. Это означает, что приходится рассматривать несколько сценариев развития сети. Другой подход заключается в оценке величин ψ_{min} и ψ_{max} с заранее выбранными доверительными интервалами.

Интересен также метод, основанный на модели Тьюки-Хьюбера [66]. Функция $F(t)$ представляется такой суммой:

$$F(t) = (1-\varepsilon)F_0(t) + \varepsilon H(t). \tag{1.17}$$

Функция $F_0(t)$ описывает тренд, который ожидается с вероятностью, близкой к единице. Тем не менее, с небольшой вероятностью ε будет наблюдаться процесс $H(t)$. В качестве примеров кривых $F_0(t)$ и $H(t)$ удобно оперировать функциями распределения. Обычно $F_0(t)$ представляет собой распределение, для которого, как минимум, определены моменты исследуемой случайной величины. Для описания $H(t)$ иногда используются редко встречающиеся распределения. В частности, полезными функциями могут стать распределения с резкими изменениями плотности.

В качестве функции $F(t)$ удобно использовать кривую $NPV(z,t)$. Параметр z будет соответствовать номеру варианта модернизации сети. Для кривых NPV задается только ограничение (1.15). Это означает, что цель Оператора связи заключается в том, чтобы к окончанию периода времени T_X величина чистой текущей стоимости эксплуатируемой сети стала максимальна, но обязательно была выше порога ψ_{min}. Функцию $NPV(z,t)$ можно вычислить по такой формуле [56, 67]:

$$NPV(z,t) = \sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t(z)}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^{n} \frac{I_t(z)}{(1+r)^t}. \tag{1.18}$$

Величина $CF_t(z)$ определяет приток денежных средств в период времени t при реализации $z-го$ варианта модернизации сети. Переменная $I_t(z)$ – сумма инвестиций в $t-ом$ периоде для варианта z. Ставка дисконтирования обозначена как r. Величина n равна количеству периодов, выделяемых в рассматриваемом проекте модернизации сети.

В качестве модели, при помощи которой иллюстрируется предлагаемый подход, используется граф, показанный на рисунке 1.36. Функция стоимости сети определяется как $NPV(z,t)$.

Максимальное количество новых вершин в модели равно трем. Следовательно, можно составить перечень всех вариантов изменения графа. Этот перечень приведен в таблице 1.1. Знак "+" означает, что рассматриваемый вариант основан на добавлении $i-й$ вершины. Если используется знак "–", то $i-я$ вершина не добавляется.

Таблица 1.1. Перечень вариантов изменения графа

Номер варианта	Обозначение новой вершины графа		
	a_6	a_5	a_7
1	+	–	–
2	+	+	–
3	+	–	+
4	+	+	+
5	–	–	–
6	–	–	+
7	–	+	–
8	–	+	+

Очевидно, что количество рассматриваемых вариантов можно уменьшить, если отбросить заведомо неприемлемые решения. Их характерными примерами могут служить варианты с пятого по восьмой. Можно исключить и третий вариант, учитывая заданные значения вероятностей появления новых вершин в рассматриваемом графе. В результате, достаточно исследовать только три функции: $NPV(1,t)$, $NPV(2,t)$ и $NPV(4,t)$. Будем считать, что в дополнение к таблице задана очередность строительства узлов сети, то есть введения одноименных вершин графа.

Варианту №1, которому соответствует функция $NPV(1,t)$, присущи минимальные начальные инвестиции, но отказ от создания вершин a_5 и a_7, по всей видимости, может привести к существенному росту затрат в перспективе. Реализация варианта №4 – ему соответствует функция $NPV(4,t)$ – связана с максимальными начальными инвестициями. Этому варианту присущ минимальный объем работ, который связан с последующим введением вершин a_5 и a_7. Вариант №2, которому соответствует функция $NPV(2,t)$, можно считать компромиссом между двумя возможными решениями, представленными выше.

Предположим, что для функций $NPV(1,t)$, $NPV(2,t)$ и $NPV(4,t)$ при $t=T_X$ были определены точки $A(z,T_X)$ и $B(z,T_X)$. Эти точки определяют доверительный интервал чистой текущей стоимости для варианта z. Нахождение значений $A(z,T_X)$ и $B(z,T_X)$ не следует рассматривать как необходимую операцию для получения рационального решения. Тем не менее, использование этих показателей позволяет повысить качество разрабатываемого проекта.

На рисунке 1.38 изображены типичные кривые $NPV(1,t)$, $NPV(2,t)$ и $NPV(4,t)$. Они иллюстрируют качественный характер рассматриваемых процессов. Обычно эти кривые отличаются плавным изменением или отображаются при помощи гистограмм. Для выбранного примера – чтобы упростить иллюстрацию – использованы ломаные линии.

Пунктирная линия обозначает заданный уровень ψ_{min}. Расположение точек $A(z,T_X)$ и $B(z,T_X)$ показано только для второго и четвертого вариантов модернизации сети.

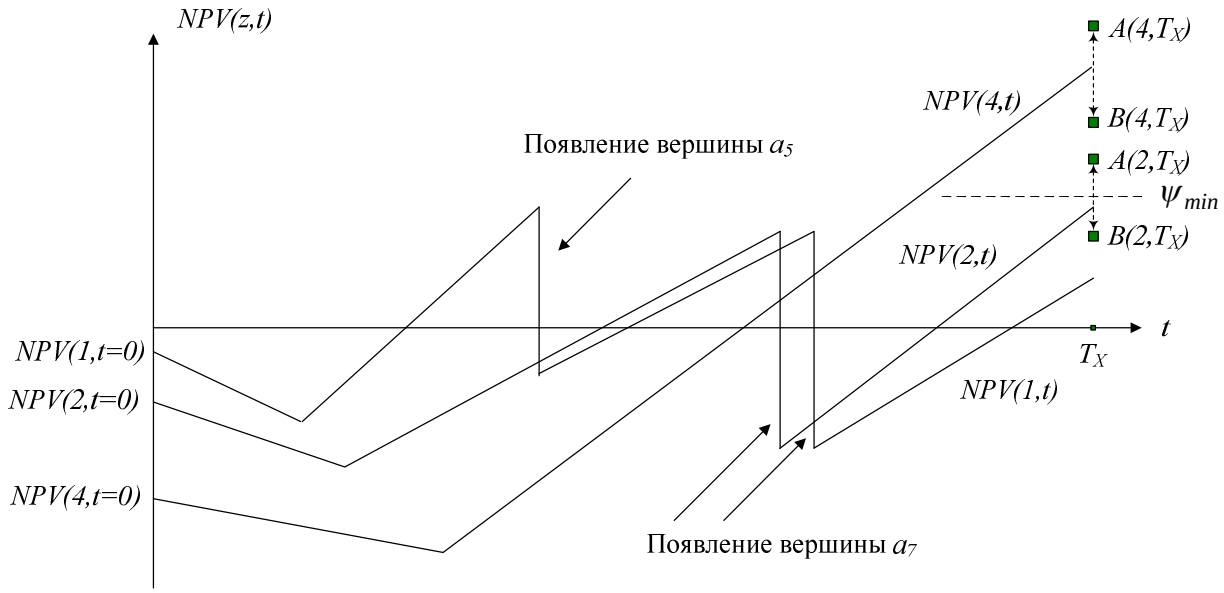


Рисунок 1.38. Типичные кривые чистой приведенной стоимости

По очевидным соображениям предпочтение следует отдать четвертому варианту модернизации сети. Правда, и второй вариант, учитывая место расположения точки $A(2,T_X)$, не следует сразу же исключать из дальнейшего анализа. Возможно, детальное исследование этого решения выявит его положительные преимущества. В частности, при большом значении модуля величины $NPV(4,t=0)$ практическая значимость второго варианта возрастает. Первый вариант можно исключить из дальнейшего рассмотрения. Очевидно, что он не удовлетворяет критерию, заданному для допустимых решений.

Предлагаемый подход к выбору структуры сети представляется плодотворным с точки зрения долгосрочных перспектив развития телекоммуникационной системы. В настоящее время за длительный период времени T_X последовательно разрабатывается ряд проектов модернизации сети связи. Каждый проект охватывает некий период времени, который меньше T_X. Структура сети, сложившаяся к началу работ над каждым новым проектом, рассматривается как данность (принцип *"as is"*). Не исключено, что каждый проект содержит оптимальное решение в части структуры сети. С другой стороны, такой подход не гарантирует, что за период времени T_X сеть электросвязи модернизировалась оптимально. Именно это обстоятельство служит стимулом к поиску решения, которое названо *рациональным*.

Литература к Главе 1

Использованные источники

1. R. Maltzman, K.M. Rembis, M. Donisi, M. Farley, R.C. Sanchez, A.Y. Ho. Design for Networks – The Ultimate Design for X. – Bell Labs Technical Journal, Vol. 9, Number 4, 2005.
2. Н.А. Соколов. Сети абонентского доступа. Принципы построения – Пермь: "Энтер-профи", 1999.
3. И.М. Котиков. Технологии проводного абонентского доступа для мультисервисных сетей связи. – Технологии и средства связи, №3, 2003.
4. Н.А. Соколов. Телекоммуникационные сети. – М.: Альварес Паблишинг, 2004.

5. S. Hawley. Access networks for triple-play services. – TelephonyOnline.com, November 15, 2002.
6. ITU-T. Definitions of terms related to quality of service. Recommendation E.800. – Geneva, 2008.
7. И.М. Жданов, Е.И. Кучерявый. Построение городских телефонных сетей. – М.: Связь, 1972.
8. Исследование операций: в 2-х томах. Перевод с английского под редакцией Дж. Моудера, С. Элмаграби. – М.: Мир, 1981.
9. В.В. Глущенко. Прогнозирование. – М.: Вузовская книга, 2000.
10. Н.Н. Моисеев. Ю.П. Иванилов, Е.Н. Столярова. Методы оптимизации. – М.: Наука, 1978.
11. А.В. Аттетков, С.В. Галкин, В.С. Зарубин. Методы оптимизации. – М.: издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001.
12. К.Р. Макконнелл, С.Л. Брю. Экономикс: Принципы, проблемы и политика. – М.: ИНФРА-М, 2001.
13. Р.С. Пиндайк, Д.Л. Рубинфельд. Микроэкономика. – М.: издательство "Дело", 2001.
14. Е.В. Мархай. Основы технико-экономического проектирования городских телефонных сетей. – М.: Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио, 1953.
15. Г.Б. Давыдов, В.Н. Рогинский, А.Я. Толчан. Сети электросвязи. – М.: Связь, 1977.
16. CCITT. Manual "Local Network Planning". – ITU, Geneva, 1979.
17. Р. Бесслер, А. Дойч. Проектирование сетей связи: Справочник. – М.: Радио и связь, 1988.
18. Г.В. Вемян. Передача речи по сетям электросвязи. – М.: Радио и связь, 1985.
19. В. Бабков. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование. – М.: Артос, 2000г.
20. Т. Уилльямс. ЭМС для разработчиков продукции. – М.: издательский дом "Технологии", 2003.
21. М.Е. Смолянский. Проектирование линейных сооружений ГТС. – М.: Радио и связь, 1989.
22. Е.П. Дубровский. Канализационно-кабельные сооружения связи. – М.: Высшая школа, 1991.
23. А.И. Овсянников, В.Ф. Колесников, М.К. Цыбулин. Основы проектирования сооружений связи: Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1991.
24. Telecommunications Management Network (TMN) Standard. Technology Report. – Faulkner Information Services, 2003.
25. G. Chen, Q. Kong. Integrated Telecommunications Management Solutions. – Wiley-IEEE Press, 1999.
26. Я.С. Дымарский, Н.П. Крутякова, Г.Г. Яновский. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи. – М.: издательство "Мобильные коммуникации", 2003.
27. Большой энциклопедический словарь. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – М.: "Большая Российская Энциклопедия"; СПб.: издательство "Норинт", 1997.
28. Н.П. Бусленко. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978.
29. Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. Моделирование систем. – М.: Высшая школа, 1998.
30. Н. Кристофидес. Теория графов: Алгоритмический подход. – М.: Мир, 1978.
31. О.Е. Акимов. Дискретная математика: логика, группы, графы. 2-е издание, дополненное. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.
32. Теория сетей связи. Под редакцией В.Н. Рогинского. – М.: Радио и связь, 1981.
33. Б.С. Лившиц, А.П. Пшеничников, А.Д. Харкевич. Теория телетрафика. – М.: Связь, 1979.

34. Ю.Н. Корнышев, А.П. Пшеничников, А.Д. Харкевич. Теория телетрафика. – М.: Радио и Связь, 1996.
35. В.В. Афанасьев, Ю.М. Горностаев. Эволюция мобильных сетей. – М.: "Связь и бизнес", 2001.
36. П. Ланкастер. Теория матриц. – М.: Наука, 1978.
37. Л. Клейнрок. Теория массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1979.
38. Л. Клейнрок. Вычислительные системы с очередями. – М.: Мир, 1979.
39. D.G. Kendall. Some problems in the Theory of Queues. – J. Roy Stat. Soc. (B), Vol. 13, N2, 1951.
40. Г.П. Башарин. К.Е. Самуйлов. Математическая модель одной системы передачи данных с синхронизирующими сообщениями. Тезисы докладов четвертого Всесоюзного совещания по информационным сетям. – М.: Наука, 1981.
41. ITU-D. Teletraffic Engineering Handbook (edited by V.B. Iversen). – Geneva, 2003.
42. Основные положения развития Взаимоувязанной сети связи Российской Федерации на перспективу до 2005 года. Книга 2 "Основные положения развития первичной сети общего пользования". – М.: Государственная комиссия по электросвязи при Министерстве связи Российской Федерации, 1996.
43. Н.А. Соколов, Р.Д. Рерле. Управление емкостью пучка в цифровых кроссовых узлах. – Труды четвертого международного семинара по теории телетрафика и компьютерному моделированию (МСТТКМ-4), 1992.
44. Э. Разроев. Инфокоммуникационный бизнес: управление, технологии, маркетинг. – СПб.: издательство "Профессия", 2003.
45. А.В. Крендзель. Планирование перспективных сетей доступа. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, СПб.: ГУТ, 2001.
46. P. Darling. Telstra's "Next Generation Network" – Telecommunications Journal of Australia, Vol. 56, No 1, 2006.
47. O. Taaffe. The move from capacity to capability. – Telecommunications International, December, 2005.
48. N.A. Sokolov. Traffic forecasting and access network planning. – Proceedings of International Teletraffic Seminar "Teletraffic theory as a base for QoS: monitoring, evaluation, decision", St. Petersburg, 1998.
49. M. Hopkins, G. Louth, H. Bailey, R. Yellon, A. Ajibutu, M. Miva. A Multi-Faceted Approach to the Forecasting Broadband Demand and Traffic. – IEEE Communications Magazine, February 1995.
50. K. Stordahl, E. Murphy. Forecasting Long-Term Demand for Services in the Residential Market. – IEEE Communications Magazine, February 1995.
51. N. Sokolov. Traffic Forecasting for the Digital Overlay Networks. – Proceedings of the International Conference "Distributed Computer Communication Networks. Theory and Application", Tel-Aviv, 1997.
52. K. Stordahl. Forecasting – An Important Factor for Network Planning. – Telektronikk, № 3/4, 2003.
53. С. Дробышевский, В. Носко, Р. Энтов, А. Юдин. Эконометрический анализ динамических рядов основных макроэкономических показателей. – Научные труды №34Р Института экономики переходного периода, М.: 2001.
54. К. Брамер, Г. Зиффлинг. Фильтр Калмана-Бьюси. М.: Наука, 1982.
55. T. Jensen. Network Planning – Introductory Issue. – Telektronikk, №3/4, 2003.
56. И.М. Лифиц. Теория и практика оценки конкурентоспособности товаров и услуг. – М.: Юрайт, 2001.
57. Р. Штойер. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения. – М.: Радио и связь, 1992.
58. Л.Н. Тэпман. Риски в экономике. Учебник под редакцией В.А. Швандара. – М.: ЮНИТИ, 2002.

59. А.А. Новоселов. Математическое моделирование финансовых рисков. Теория измерений. – Новосибирск, Наука, 2001.
60. http://encycl.yandex.ru.
61. Я.С. Дымарский, В.П. Морозов. Элементы теории управления ГАП. – Л.: "Машиностроение", 1984.
62. В.Н. Спицнадель. Теория и практика принятия оптимальных решений. – СПб.: издательский дом "Бизнес-пресса", 2002.
63. W.R. Huss. A move towards scenarios. – International Journal of Forecasting, 1988, No 4.
64. С.А. Юдицкий. Сценарный подход к моделированию поведения бизнес-систем. – М.: Синтег, 2001.
65. М.В. Звягинцев, Д.С. Маслов, Н.А. Соколов. Выбор структуры сети связи с учетом жизненного цикла ее элементов. – Электросвязь, №8, 2010.
66. А.И. Орлов. Эконометрика. – М.: издательство "Экзамен", 2002.
67. В.И. Котов. Анализ рисков инвестиционных проектов на основе функций чувствительности и теории нечетких множеств. – СПб.: Судостроение, 2007.

Перечень дополнительной литературы к Главе 1

- П.Л. Виленский, В.Н. Лившиц, С.А. Смоляк. Оценка эффективности инвестиционных проектов: Теория и практика. – М.: Дело, 2004.
- Д.С. Гулевич. Сети связи следующего поколения. – М.: Интернет-Университет Информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007.
- Б.С. Гольдштейн. Системы коммутации. – СПб.: БХВ, 2003.
- Б.В. Зверев, Е.П. Зелевич. Социально ориентированные услуги связи. – М.: Радио и связь, 2005.
- Н. Кобаяси. Введение в нанотехнологию. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005.
- Р. Кох, Г. Яновский. Эволюция и конвергенция в электросвязи. – М.: Радио и связь, 2001.
- М.Ф. Лутов, М.А. Жарков, П.А. Юнаков. Квазиэлектронные и электронные АТС. – М.: Радио и связь, 1988.
- В.А. Росляков. Общеканальная система сигнализации №7. – М.: Эко-Трендз, 1998.
- А. Филимонов. Построение мультисервисных сетей Ethernet. – СПб.: БХВ, 2007.
- А.В. Шмалько. Цифровые сети связи: основы планирования и построения. – М.: Эко-Трендз, 2001.
- Ф. Юнг. Перспективы развития инфокоммуникаций. – СПб.: "Петеркон", 2003.
- В. Горальски. ADSL. – М.: издательство «Лори», 2007.
- Л.Е. Варакин. Распределение доходов, технологий и услуг. – М.: МАС, 2002.
- Развитие инфокоммуникаций России в период 1991 – 2006 годы. Итоги 15-летней эпохи. Составители: Л.Е. Варакин, Д.А. Пожарский, А.Г. Шилов. – М.: МАС, 2006.
- В.В. Макаров. Телекоммуникации в России: состояние, тенденции и пути развития. – М.: ИРИАС, 2007.
- В.И. Битнер, Г.Н. Попов. Нормирование качества телекоммуникационных услуг. – М.: "Горячая линия – Телеком", 2004.
- В.П. Дьяконов, А.А. Образцов, В.Ю. Смердов. Электронные средства связи. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005.
- В.В. Качала. Основы теории систем и системного анализа. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007.

- Дж. Лодон, К. Лодон. Управление информационными системами. – СПб.: Питер, 2005.
- И.Г. Бакланов. NGN: принципы построения и организации. – М.: Эко-Трендз, 2008.
- А.Е. Кучерявый, А.И. Парамонов, Е.А. Кучерявый. Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчета. – М.: ФГУП ЦНИИС, 2008.
- Д.М. Ненадович. Методологические аспекты экспертизы телекоммуникационных проектов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008.
- Т.А. Кузовкова, Л.С. Тимошенко. Анализ и прогнозирование развития телекоммуникаций. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009.
- Б.С. Гольдштейн, Н.А. Соколов, Г.Г. Яновский. Сети связи. – СПб.: БХВ, 2010.
- R. Horak. Communications systems and networks. – M&T Books, New York, 1997.
- M. Feneyrol. Telecommunication in the 21st Century. The Real and the Virtual. – Springer, London, 1998.
- S.R. Ali. Digital Switching Systems: System Reliability and Analysis. – McGraw-Hill, Inc, 1998.
- R. A. Thompson. Telephone Switching Systems. – Artech House, Boston, London, 2000.
- J.C. Bellamy. Digital Telephony. Third Edition. – John Wiley & Sons, Inc, 2000.
- Telecommunications Optimization: Heuristic and Adaptive Techniques. Edited by D.V. Corne, M.J. Oates, G.D. Smith. – John Wiley & Sons, Ltd, 2000.
- N. Wilkinson. Next Generation Network Services. Technologies and Strategies. – John Wiley & Sons, Ltd., 2002.
- R. M. Roberts. Networking Fundamentals. – The Goodheart-Willcox Company Inc., Illinois, 2005.

Товарищи! В эпоху больших скоростей
художник должен думать медленно.
(Юрий Олеша)

2. Методы расчета транспортной сети

Надо запастись либо умом, чтобы понимать,
либо веревкой, чтобы повеситься.
(Антисфен)

2.1. Процесс планирования транспортной сети

В этой главе основное внимание уделяется вопросам планирования транспортной сети. Операторы местной телефонной связи обычно создавали *собственные* транспортные сети. Часть транспортных ресурсов предоставлялась другим потребителям – продавалась или сдавалась в аренду. Это обстоятельство учитывалось при расчете пропускной способности транспортной сети. Ранее основными потребителями транспортных ресурсов – помимо ТФОП – были Операторы сетей телеграфной связи, а также организации, нуждающиеся в так называемых "прямых проводах". Этот термин – пример названий из профессионального сленга. "Прямой провод" представлял собой арендуемый канал ТЧ. В настоящее время вместо канала ТЧ часто арендуются ОЦК либо цифровые тракты с пропускной способностью 2048 кбит/с и более.

И для организации внутризоновой и междугородной телефонной связи Операторы ТФОП обычно задействовали собственные транспортные ресурсы. В некоторых случаях необходимые транспортные ресурсы арендовались у других компаний. При переходе к ССП возрастают требования к надежности обмена информацией, что актуализирует вопросы взаимодействия Операторов дальней связи. Такой подход не влияет на задачи, касающиеся, например, расчета пропускной способности транспортной сети. Изменяется постановка ряда задач по оценке характеристик надежности сети. Трансформируются также задачи, относящиеся к технико-экономическому анализу.

Переход к ССП будет осуществляться в процессе развития ТФОП. С точки зрения разработки методики планирования инфокоммуникационной системы этот факт позволяет ограничить возможное множество топологических и технологических решений. Тем не менее, такие ограничения не сказываются на методологии планирования транспортной сети.

При планировании транспортной сети необходимо найти разумный компромисс между перспективными требованиями, характеристиками эксплуатируемого комплекса технических средств и теми финансовыми ресурсами, которыми располагает Оператор. Перспективные требования определяются коммутируемыми сетями. Следует учесть, что формирование ССП, как единой коммутируемой сети, будет длительным процессом. Решение задач, важных для практической деятельности, требует разработки современных методов планирования, которые предусматривают возможность функционирования нескольких коммутируемых сетей в течение десяти и более лет.

Процессы планирования единой транспортной и совокупности коммутируемых сетей тесно связаны между собой. Анализ характеристик тех средств, которые образуют транспортную сеть, основан на *паспортизации* инфраструктуры (трубопроводы кабельной канализации, распределительные шкафы и им подобные сооружения), линий передачи и используемого оборудования. В процессе паспортизации составляется база данных, в которой отражена основная информация о сети. Эта информация в значительной мере определяет разумные направления развития транспортной сети. Сбор подобных сведений представляется важным этапом для модернизации инфокоммуникационной системы вне зависимости от поставленной цели. Эта цель определяется совокупностью требований, формируемых при создании программ развития коммутируемых сетей. В результате могут быть разработаны базовые требования к перспективной транспортной сети.

При планировании транспортной сети целесообразно выделить ряд этапов. Пример такой операции показан на рисунке 2.1. Выделение этапов невозможно выполнить без анализа аналогичных процессов для коммутируемых сетей.

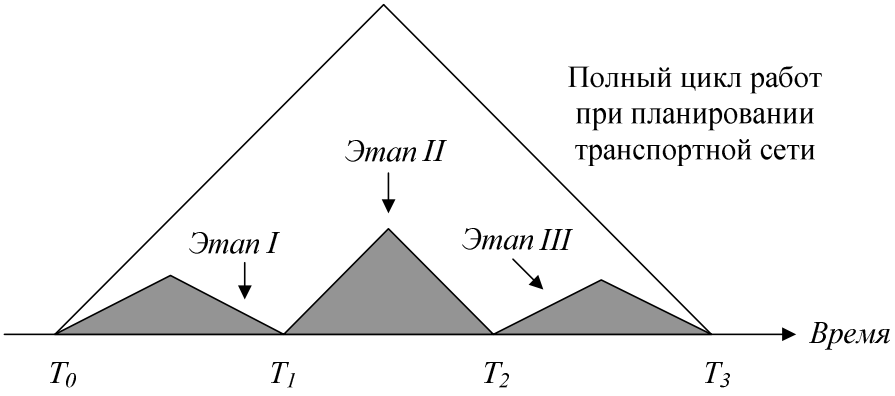


Рисунок 2.1. Три этапа планирования транспортной сети

Первый этап занимает время (T_0, T_1). Он связан с анализом состояния используемых транспортных ресурсов. В результате проведения такого анализа должны быть выявлены *сильные* и *слабые стороны* всех эксплуатируемых транспортных ресурсов, включая их инфраструктуру. На рисунке 2.2 показан гипотетический фрагмент сети доступа, который должен быть реконструирован. В качестве модели выбраны один магистральный и два распределительных участка сети доступа. Предполагается, что все используемые АЛ были организованы за счет прокладки многопарных кабелей.

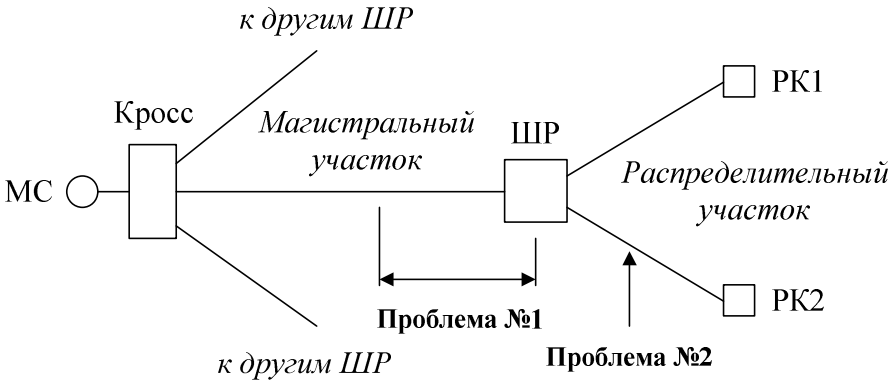


Рисунок 2.2. Модель фрагмента эксплуатируемой сети доступа

На рисунке 2.2 выделены два "слабых места" в эксплуатируемом фрагменте сети доступа. Во-первых, часть кабельной канализации на магистральном участке нуждается в замене. Этот факт назван "Проблемой №1". Во-вторых, на распределительном участке между ШР и РК2 требуется прокладка нового кабеля. Надпись "Проблема №2" отражает данный вывод как результат проведенного анализа.

Две выявленные проблемы можно отнести к внутренним свойствам транспортной сети. Следует также учесть те новые требования, которые определяются коммутируемыми сетями. Анализ этих требований занимает отрезок времени (T_1, T_2), который отмечен на рисунке 2.1. В результате должны быть сформулированы дополнительные требования, которым должна отвечать перспективная транспортная сеть. Допустим, необходимость поддержки ряда широкополосных услуг предопределяет прокладку на магистральном участке кабеля с ОВ. Кроме того, постоянно растущий спрос на новые виды услуг свидетельствует о целесообразности решения второй проблемы за счет использования кабеля с ОВ на участке между ШР и РК2.

Можно считать, что к моменту времени T_2 задача планирования транспортной сети поставлена корректно. На этапе III осуществляется ее решение, которое занимает время (T_2, T_3). Полный цикл работ по планированию транспортной сети включает период времени (T_0, T_3), выделенный на рисунке 2.1 внешним треугольником. Конечно, все три этапа планирования транспортной сети будут перекрываться по оси "Время".

На этапе III могут потребоваться итерации, о которых было сказано в первой главе монографии. Это означает, что предлагаемые решения в некоторых случаях необходимо корректировать, что обычно выявляется при подготовке окончательной версии проекта или в ходе ее обсуждения.

Решение поставленной задачи обычно достигается после завершения нескольких этапов. Например, на первом этапе ремонтируется тот фрагмент кабельной канализации, который выделен на рисунке 2.2 надписью "Проблема №1". Второй этап включает все работы по прокладке кабеля с ОВ на магистральном участке эксплуатируемой сети доступа. Третий (заключительный) этап модернизации транспортной сети состоит в прокладке кабеля с ОВ на участке ШР – РК2. Этот этап связан с решением той задачи, которая выше была названа "Проблемой №2".

В процессе планирования транспортной сети решается несколько разных задач. Среди них следует выделить три группы задач, постановку и решение которых нельзя считать тривиальными. К этим группам задач относятся прогнозирование характеристик транспортной сети, разработка сценариев ее построения и соответствующая методика расчета. Именно эти три задачи и рассматриваются в следующих разделах второй главы монографии.

Предвидение будущего должно опираться не
на предсказания и приметы, а на мудрость.
(Цицерон)

2.2. Прогнозирование характеристик транспортной сети

2.2.1. Выбор метода прогнозирования

Транспортную сеть обычно сравнивают с фундаментом инфокоммуникационной системы. Это сравнение подчеркивает тот факт, что транспортная сеть не предоставляет услуги. Аналогично, фундамент здания, сам по себе, не создает площадь для жилья или работы. С другой стороны, основная часть требований к транспортной сети определяется, исходя из функциональных возможностей инфокоммуникационной системы, которые формируются ее пользователями. Похожая картина характерна и для фундамента здания. Основные требования определяются этажностью, назначением здания и рядом других факторов, которые можно считать внешними.

Следует учитывать и требования, которые можно рассматривать как внутренние. Для транспортной сети их примером служат характеристики качества передачи информации. Если продолжить аналогию с фундаментом здания, то примером внутренних требований могут служить физические и химические свойства грунта на застраиваемой территории.

С учетом зависимости показателей транспортной сети от совокупности требований, которым должна отвечать инфокоммуникационная система, задачи, стоящие перед специалистами по прогнозированию, связаны с исследованием ряда процессов. Характер этих процессов (например, изменение пропускной способности транспортной сети и ее надежности), как правило, различен. Поэтому не удается выбрать метод прогнозирования, который годится для решения всех возникающих задач.

Требования, определяемые коммутируемыми сетями, рассматриваются в следующей главе монографии. В этом разделе основное внимание уделяется трем характеристикам, которые весьма существенны для транспортной сети: пропускная способность линий пе-

редачи, показатели надежности и используемые технологии. Следует подчеркнуть, что для первой и второй характеристик можно найти историю развития процесса – собрать статистические данные, касающиеся отрезка времени (t_r, t_0). Здесь и далее используются обозначения, которые были введены в первой главе монографии. Поставленная задача сводится к прогнозированию развития изучаемого процесса на период (t_0, t_f). Для третьей характеристики история процесса отсутствует, то есть $t_r = t_0$. Этот факт заметно усложняет задачу прогнозирования.

Очевидно, что для повышения достоверности предсказания исследуемой величины целесообразно использовать несколько методов прогнозирования. Такой подход известен как комбинированный метод прогнозирования [1]. Во многих случаях эффективен метод экспертных оценок. Для его проведения можно использовать сложные экспертизы [2]. Подобная практика очень полезна для исследования показателей, которые связаны с малоизученными процессами.

В последние годы широкое распространение для решения задач прогнозирования получил *метод Делфи* [3]. В английском языке он именуется "Delphi Method". Своим названием метод обязан дельфийскому оракулу. Он также известен как оракул Аполлона в Дельфах. Предсказаниям оракула в древней Греции верили как словам богов. Из дошедших до нас сведений следует выделить одно обстоятельство: дельфийский оракул выражал свои мысли весьма туманно. Это, как гласит история, придавало пророчествам особую значимость. Слова "выражал свои мысли весьма туманно" применительно к методу Делфи можно расценивать так: прогнозам свойственна погрешность. В терминах математической статистики ее можно считать своего рода аналогом доверительного интервала.

Метод Делфи разработан американской консалтинговой группой *RAND Corporation* более пятидесяти лет назад. Коллективное обсуждение проблем часто искажается из-за того, что некоторые эксперты, участвующие в дискуссии, невольно оказывают влияние на аудиторию. Метод Делфи основан на полном отказе от коллективной дискуссии. Поэтому исключено влияние таких психологических факторов как согласие с позицией более активных (либо авторитетных) коллег или же желание присоединиться к мнению большинства. Отказ от дискуссии существенно увеличивает время получения желаемых результатов. Ответы экспертов обрабатываются, заданные вопросы (при необходимости) могут дополняться новой информацией и повторно направляться экспертам. Мнения всех экспертов могут считаться одинаково ценными. Некоторые модификации метода Делфи предусматривают присвоение экспертам весовых коэффициентов, отражающих степень их компетентности. Для получения достоверных оценок может быть проведено несколько итераций.

Методы прогнозирования, используемые для исследования инфокоммуникационных систем, рассматриваются в четвертом Приложении к монографии. Следует отметить, что в последние годы появились интересные работы, направленные на повышение точности прогностических оценок. Интерес к прогнозированию вышел из сферы любопытства ряда специалистов, занимающихся вопросами исследования, проектирования и эксплуатации сетей связи, а также разработкой соответствующего комплекса технических средств. Дело в том, что достоверные прогностические оценки становятся эффективным инструментом в конкурентной борьбе.

Очевидно, что максимальная точность искомых оценок может быть получена за счет совместного использования формализованных и интуитивных методов прогнозирования. Оценки, полученные, например, методом Делфи, целесообразно – по возможности – дополнить результатами, которые основаны на иных подходах. Рассмотрим рисунок 2.3, на котором показано изменение требований к скорости обмена информацией в сети доступа для абонентов квартирного сектора в США [4]. Этот прогноз был разработан компанией Technology Future Inc.

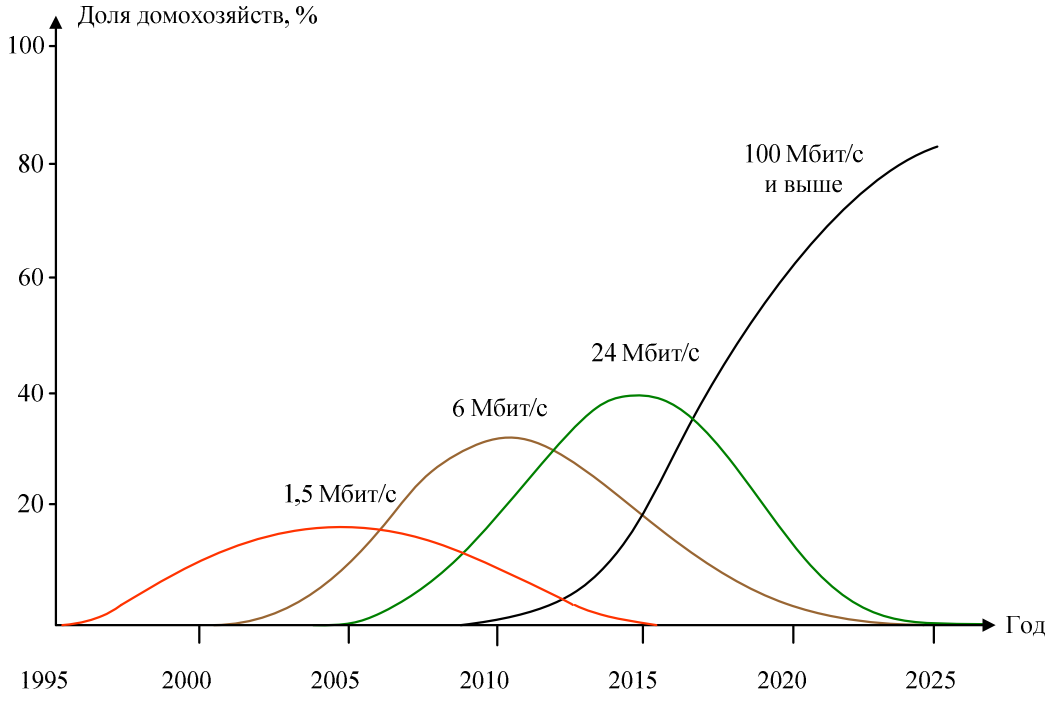


Рисунок 2.3. Изменение требований к скорости обмена информацией для абонентов квартирного сектора в США

Кривая с надписью "100 Мбит/с и выше" к моменту публикации работы (2003 год) производила сильное впечатление. Очень многие специалисты полагали, что налицо явная ошибка: скорость 100 Мбит/с никому не потребуется. Последующие годы показали, что авторы прогноза были правы. Позже появились и более "смелые прогнозы". В частности, в [5] приведен прогноз компании *Infonetics Research*, который допускает рост требований к скорости обмена информацией через сеть доступа до 1 Гбит/с.

Судя по характеру графиков, показанных на рисунке 2.3, суммарные требования к пропускной способности транспортной сети можно представить суперпозицией функций, каждая из которых очень похожа на логистическую кривую. Подобные графики называют S-образными кривыми. Они часто используются для прогнозирования процессов, в которых можно выделить три фазы: медленного начального роста, интенсивного развития и насыщения [6, 7]. Аналогичный подход вполне приемлем для решения большинства прогностических задач, возникающих в процессе планирования транспортных сетей.

В первой главе упоминалась основная цель прогнозирования на современном этапе, сформулированная в виде девиза: "Попасть в порядок". Следует учитывать и тот факт, что затраты на создание транспортных ресурсов имеют устойчивую тенденцию к снижению [8, 9]. Риск, обусловленный дефицитом транспортных ресурсов, можно считать очень существенным для Оператора. Кроме того, часть ресурсов транспортной сети может сдаваться другим эксплуатационным компаниям в аренду. Эти соображения позволяют представить пропускную способность гипотетической линии передачи – $C(t)$ тремя следующими слагаемыми:

$$C(t) = C_1(t) + C_2(t) + C_3(t). \qquad (2.1)$$

Величина $C_1(t)$ – пропускная способность, необходимая для обслуживания трафика в коммутируемых сетях. Основные сложности прогнозирования связаны именно с этим слагаемым. Значение $C_2(t)$ определяет тот запас пропускной способности, который нужен для минимизации риска, обусловленного чрезмерным ростом трафика в коммутируемых сетях. Величины $C_1(t)$ и $C_2(t)$ обычно связаны постоянным коэффициентом – k_B:

$$C_2(t) = k_B C_1(t). \qquad (2.2)$$

Для Оператора, предоставляющего, в основном, услуги телефонной связи, величина этого коэффициента обычно не превышает 0,5. По мере роста спроса на широкополосные услуги значение k_B, возможно, будет измеряться единицами. Некоторые Операторы из развитых стран в частных беседах высказывали мнение о целесообразности установления значения коэффициента k_B на уровне порядка 3,0.

Слагаемое $C_3(t)$ – транспортные ресурсы, которые предназначены для сдачи в аренду. Значение $C_3(t)$ обычно определяется на основании маркетинговых исследований. Известно, что сдача каналов и трактов в аренду – не лучшее использование транспортных ресурсов [9]. Другим эксплуатационным компаниям чаще предлагаются ресурсы, которые Оператор уже создал, но не собирается использовать в течение длительного периода времени.

Соображения, изложенные выше, свидетельствуют о том, что основные сложности прогнозирования связаны со слагаемым $C_1(t)$. В начале этого параграфа перечислялись три основные сферы для прогнозирования: пропускная способность линий передачи, показатели надежности, используемые технологии. Определение слагаемого $C_1(t)$ связано с задачей прогнозирования пропускной способности линий передачи. Анализ опыта, накопленного при решении проектных задач, свидетельствует о целесообразности комбинированного подхода к прогнозированию за счет использования метода Делфи и одной из моделей, основанной на выборе S-образной кривой. Методика такого прогноза изложена в следующем параграфе.

Прогностические оценки для показателей надежности и используемых технологий также могут быть основаны на методе Делфи. При прогнозировании показателей надежности следует учитывать факторы, обусловленные заключением соглашений об уровне обслуживания, которые более известны по аббревиатуре SLA [10, 11]. Аспектам прогнозирования показателей надежности и технологий, используемых в современных транспортных сетях, посвящены параграфы 2.2.3 и 2.2.4 соответственно.

2.2.2. Пропускная способность линий передачи

В разделе 1.4 упоминалось о диверсификации требований потенциальных клиентов Оператора. Пропускная способность, необходимая пользователю, в значительной мере зависит от вида предоставляемых инфокоммуникационных услуг.

Некоторые виды услуг практически не меняют требований к пропускной способности. Например, классическая телефония ориентирована на стандартный канал ТЧ. Переход части абонентов на услуги IP-телефонии не существенно сказывается на суммарной (для транспортной сети в целом) пропускной способности. Иная ситуация складывается с теми ресурсами пропускной способности, которые предназначены для обслуживания трафика данных и видео. В частности, развитие рынка информационных и развлекательных услуг, предоставляемых только при наличии широкополосного доступа в Internet, а также переход к новым стандартам телевидения стимулируют существенный рост пропускной способности транспортной сети [4]. Судя по кривым, приведенным на рисунке 2.3, скорость доступа возрастет на несколько порядков.

Для оценки транспортных ресурсов целесообразно рассмотреть модель, показанную на рисунке 2.4. Эта модель иллюстрирует фрагмент транспортных ресурсов для сети доступа, которая используется для поддержки всех видов инфокоммуникационных услуг. В левой части этого рисунка изображено несколько групп пользователей, различие между которыми заключается в величине используемых транспортных ресурсов. Первая группа ранее, как правило, насчитывала максимальное число пользователей. Им были достаточны транспортные ресурсы, определяемые возможностями канала ТЧ. Для линии передачи,

организованной в тракте SDH, ресурс такого рода соответствует пропускной способности ОЦК со скоростью обмена информацией 64 кбит/с.

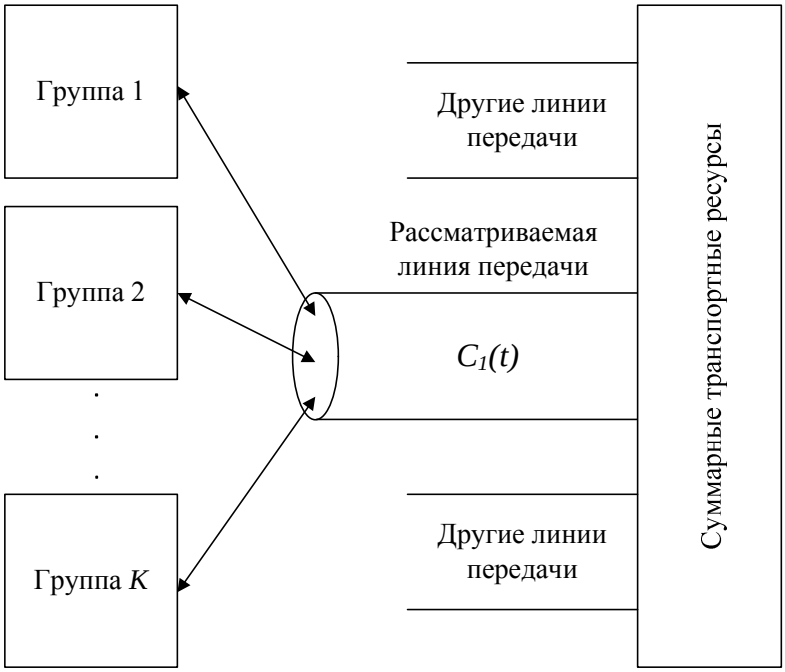


Рисунок 2.4. Фрагмент транспортных ресурсов сети доступа

Для первой группы пользователей расчет необходимых транспортных ресурсов предельно прост. Количество требуемых ОЦК совпадает с численностью пользователей, образующих первую группу, если в сети доступа не применяются концентраторы. В том случае, когда абонентские линии включаются в концентраторы, для оценки транспортных ресурсов используются известные методы теории телетрафика. Это означает, что при планировании сети доступа необходимо достоверно оценить ту долю пользователей, для которых ресурсы канала ТЧ или ОЦК представляются достаточными в течение всего периода прогнозирования. Удельный вес пользователей первой группы будет постепенно сокращаться.

Вторая группа пользователей заинтересована в таких ресурсах транспортной сети, для которых достаточно подключить оборудование, известное по аббревиатуре xDSL. Это сокращение обычно используется как общее обозначение для ряда технологий цифровой абонентской линии. Для рассматриваемой группы пользователей интерес представляют как асимметричные, так и симметричные варианты реализации xDSL. Численность второй группы пользователей в развитых странах в начале XX века росла очень быстро [9]. В России наблюдался аналогичный процесс.

Продолжая аналогичные рассуждения, можно добраться до группы K. В эту группу войдут пользователи с очень высоким спросом на широкополосные услуги. Необходимые транспортные ресурсы измеряются десятками и даже сотнями Мбит/с. Удельный вес пользователей делового сектора, входящих в группу K, в течение ближайших лет будет расти заметными темпами.

Для перспективного проектирования (когда нет острой необходимости в разработке конкретных решений) можно ограничиться тремя группами пользователей. Это означает, что $K = 3$. На основании изложенных соображений функция $C_1(t)$ для случая $K = 3$ может быть представлена такой суммой:

$$C_1(t) = N_{11}C_{11}(t) + N_{21}C_{21}(t) + N_{31}C_{31}(t). \qquad (2.3)$$

Величина N_{i1} определяет количество пользователей в $i-ой$ группе. Необходимые транспортные ресурсы для пользователя $i-ой$ группы в момент времени t обозначены

как $C_{i1}(t)$. Оценивать величину $C_{i1}(t)$ целесообразно эквивалентным количеством ОЦК. В таблице 2.1 приведен пример оценки транспортных ресурсов (в количестве ОЦК) для фрагмента сети доступа, обслуживающего 1000 пользователей. Предполагается, что линия передачи организована в тракте SDH без использования функции концентрации трафика.

Таблица 2.1. Пример оценки транспортных ресурсов

Период времени	$N_1C_{11}(t)$	$N_2C_{21}(t)$	$N_3C_{31}(t)$	$C_1(t)$
$t = t_0$ 1)	1000	0	0	1000
$t_0 < t < t_f$ 2)	890	3200	3200	7290
$t = t_f$ 3)	650	9600	16000	26250

Примечания:

1) Для исходного состояния фрагмента сети доступа ($t = t_0$) предполагается, что каждому пользователю выделяется один ОЦК.

2) Промежуточный этап прогнозирования ($t_0 < t < t_f$) выбран так, что доли пользователей N_{21} и N_{31} составляют 10% и 1% соответственно. При этом необходимые транспортные ресурсы составляют 32 и 320 ОЦК соответственно.

3) На заключительном этапе прогнозирования ($t = t_f$) предполагается рост пользователей N_{21} и N_{31} до 30% и 5% соответственно. Номиналы транспортных ресурсов не изменяются.

Таблица 2.1, при всей условности допущений, иллюстрирует одно очень важное обстоятельство: необходимые транспортные ресурсы будут определяться численностью групп пользователей, которые заинтересованы в широкополосном доступе. К сожалению, именно для этих групп пользователей сложно получить достоверные прогностические оценки величин N_{i1} и $C_{i1}(t)$.

Для прогнозирования величин N_{i1} и $C_{i1}(t)$ можно использовать метод, основанный на одном из важнейших экономических показателей – валовом внутреннем продукте (ВВП) на душу населения. В ряде работ, например в [7, 12], обоснована оценка спроса на инфокоммуникационные услуги – $D(t)$, которую можно представить функцией такого вида:

$$D(t) = \left(\frac{G_t}{G_0}\right)^b F_j(t). \qquad (2.4)$$

Величины G_t и G_0 – значения ВВП на душу населения к прогнозируемому моменту времени t и к начальной (нулевой) точке на оси "Время" соответственно. Коэффициент b определяет степень влияния ВВП на уровень платежеспособного спроса для оцениваемой услуги. Функция $F_j(t)$ описывает подходящую прогностическую кривую. Типичные примеры функций $F_j(t)$ рассмотрены в четвертом Приложении к монографии.

В [13] предложена методика прогнозирования, основанная на том, что характер процессов, описывающих развитие инфокоммуникационной системы в России и в развитых странах, совпадает. Такой вывод основан на анализе имеющейся статистики. Различия можно обнаружить в трех показателях исследуемых процессов:

- абсолютные значения максимума (*амплитуда*);
- скорость развития (*частота*);
- сдвиг начальной точки на оси "Время" (*фаза*).

Эти факторы можно учесть за счет модификации функции $F_j(t)$. Конечно, такой подход несколько снижает достоверность прогностических оценок. Изменения амплитуды

предлагается учитывать, умножая выражение (2.4) на коэффициент k_A. Вычисление этого коэффициента может осуществляться по приближенной формуле:

$$k_A = \vartheta \frac{G_R}{G_M}. \qquad (2.5)$$

Величина G_R определяет душевой ВВП для России. Этот показатель целесообразно оценивать с учетом объемов "серого" и "черного" рынков. Величина G_M – душевой ВВП для модели. В качестве модели выбирается процесс развития рынка услуг в какой-нибудь стране, для которой публикуется соответствующая информация. Введение поправочного коэффициента ϑ позволяет учитывать особенности рассматриваемого процесса с точки зрения его важности для потенциальных пользователей. В частности, для рынка сотовой связи коэффициент ϑ больше отношения G_R к G_M, что подтверждает высокая плотность мобильных терминалов в России. Если известен характер идентичных процессов для ряда стран или какого-либо региона, то составляется несколько прогнозов, что повышает достоверность полученных результатов.

Изменения частоты можно учесть, заменяя переменную t в формуле $F_j(t)$. Новая переменная – t_F определяется следующим образом:

$$t_F = \xi \frac{H_M}{H_R} t. \qquad (2.6)$$

Величина H_M равна среднему тарифу, установленному Оператором, сеть которого выбрана в качестве модели. В знаменатель формулы (2.6) подставляется средний тариф, который предполагает установить российский Оператор. Поправочный коэффициент ξ учитывает особенности рассматриваемого процесса с точки зрения скорости его развития. Если правила оценки этого коэффициента не представляются очевидными, то можно считать, что $\xi = 1$. Косвенным подтверждением справедливости подхода, основанного на отношении H_M к H_R служит график, который иллюстрирует влияние тарифа на долю домохозяйств, использующих широкополосный доступ [14]. Этот график воспроизведен в [9] и снабжен рядом комментариев.

Изменение фазы сводится к сдвигу графика вправо по оси "Время" на некоторую величину τ. Значение этой величины определяется элементарно. Для этого необходимо найти год начала исследуемого процесса в стране, которая выбрана в качестве модели, и сопоставить его с планами российского Оператора.

Формула (2.4), определяющая прогноз исследуемого процесса для российских условий – $D_R(t)$, может быть представлена в такой редакции:

$$D_R(t) = k_A \left(\frac{G_t}{G_0} \right)^b F_j(t_F - \tau). \qquad (2.7)$$

В [15] приведена формула, принятая для прогнозирования в странах Европейского Союза (ЕС). В этой формуле отношение в круглых скобках содержит значения душевого ВВП для конкретной страны и ЕС в целом. Существенно то, что в упомянутой формуле $b = 1$. Возможно, что такое значение показателя степени можно принять и для выражения (2.7). Следует еще раз напомнить, что предлагаемый подход позволяет прогнозировать большинство процессов с учетом выбранной ранее цели – "Попасть в порядок".

Если для прогнозирования доступны данные по транспортной сети Оператора из развитой страны (лучше – из нескольких государств), то нет необходимости в тщательном анализе требований, которые формируются коммутируемыми сетями. Правда, такой подход будет корректным, если российский Оператор использует транспортные ресурсы для

такого же набора коммутируемых сетей. В противном случае придется анализировать требования к транспортным ресурсам, формируемым всеми группами пользователей. Этот вопрос рассматривается в третьей главе монографии.

2.2.3. Показатели надежности транспортной сети

Транспортная сеть – только один из компонентов инфокоммуникационной системы. С точки зрения теории надежности все компоненты инфокоммуникационной системы, которые относятся к сети связи, соединены последовательно [16, 17]. Это утверждение справедливо для двух разных вариантов декомпозиции инфокоммуникационной системы:

- на единую транспортную и совокупность коммутируемых сетей;
- на уровни иерархии транспортной или коммутируемых сетей.

В этом параграфе целесообразно рассматривать оба варианта декомпозиции, так как они – каждый по-своему – интересны для оценки надежности инфокоммуникационной системы. В настоящее время общепринятой нормой для коэффициента готовности (Availability) стала величина 0,99999 [18, 19]. Кстати, в середине 90-х годов XX века коэффициент готовности 0,9999 (на порядок меньше!) обеспечивался далеко не всеми Операторами развитых стран [20].

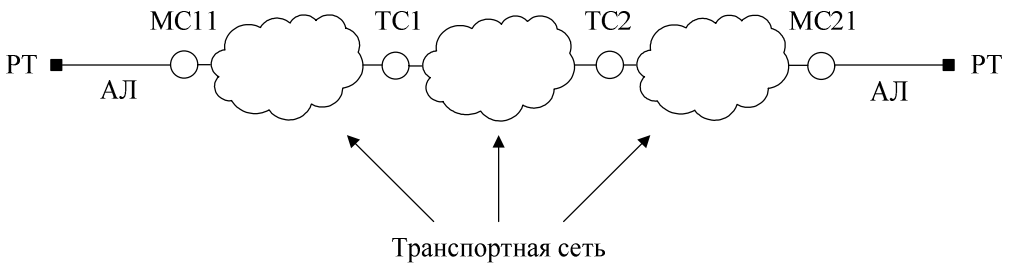
Коэффициент готовности – A (в отечественной научной и технической литературе часто используется обозначение $K_Г$) определяется простым соотношением [16, 17]. Для его расчета необходимо оценить средние значения промежутков времени между отказами – $T_0^{(1)}$ и восстановлениями – $T_B^{(1)}$. Тогда коэффициент готовности вычисляется по такой формуле:

$$A = \frac{T_0^{(1)}}{T_0^{(1)} + T_B^{(1)}}. \qquad (2.8)$$

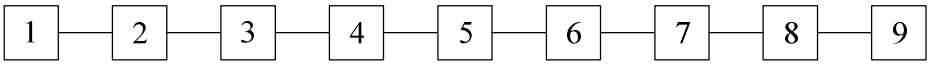
Если в формулу (2.8) подставить значение коэффициента готовности на уровне 0,99999, то допустимое время восстановления *за один год* составит примерно *5,3 минуты*. Такой показатель, по всей видимости, не может быть обеспечен за счет каких-либо действий обслуживающего персонала, связанных с ручным трудом (в частности, с заменой части поврежденного кабеля). Необходимо предусматривать резервирование. Например, в современных сетях SDH высокий коэффициент готовности обеспечивается применением кольцевых структур. В этом случае восстановление связи осуществляется в течение 50 мс.

Даже если отказ в кольцевой сети будет происходить каждый день, то суммарное время простоя составит менее половины минуты за один год. Соответственно, простой длительностью 5,3 минуты за один год может фиксироваться при нескольких обрывах кольца в день. Такая ситуация не может рассматриваться как реальная. Таким образом, апробированные механизмы защиты кольцевых топологий SDH гарантируют соблюдение показателей надежности инфокоммуникационной системы в эксплуатационных условиях, которые характерны для штатной ситуации. Иными словами, развитие событий при каких-либо чрезвычайных ситуациях не рассматривается. Конечно, нештатные ситуации следует тщательно анализировать, но подобные исследования не входят в перечень тех вопросов, которым посвящена данная монография.

Коэффициент готовности каждого компонента транспортной и коммутируемой сети должен быть выше величины, нормируемой для инфокоммуникационной системы в целом. В верхней части рисунка 2.5 показана модель фрагмента телефонной сети, состоящей из пары МС, связанных через две транзитные станции (ТС). Между каждой телефонной розеткой и опорной МС создана двухпроводная физическая цепь. Все смежные коммутационные станции связаны между собой транспортной сетью. Каждая транспортная сеть реализована в виде кольца SDH, что обеспечивает высокие значения коэффициента готовности данного компонента инфокоммуникационной системы.



а) Тракт обмена информацией между терминалами пользователей



б) Эквивалентная схема для расчета коэффициента готовности

Рисунок 2.5. Модели для оценки коэффициента готовности

Для сети доступа выполнение современных требований к величине коэффициента готовности представляет собой очень сложную проблему, так как АЛ не резервируется. В нижней части рисунка 2.5 приведена эквивалентная схема, которая полезна с точки зрения расчета коэффициента готовности для рассматриваемой модели. Она состоит из девяти элементов: АЛ (1, 9), МС (2, 8), транспортная сеть (3, 5, 7) и ТС (4, 6).

Высокая надежность коммутационных станций (элементы 2, 4, 6 и 8) обеспечивается резервированием основных функциональных блоков и иными методами поддержки тех эксплуатационных требований, которые свойственны современным телефонным сетям. В частности, могут использоваться обходные направления [21], если МС включаются в две (или более) ТС. Надежность транспортных сетей (элементы 3, 5 и 7) гарантируется их структурой, а также функциональными свойствами оборудования SDH.

Это означает, что *"узким местом"* для обеспечения необходимого коэффициента готовности остаются АЛ, то есть сети доступа. Этот вывод подтверждает диаграмма, изображенная на рисунке 2.6. Она построена по статистическим данным [22], которые получены и обработаны Международной организацией по стандартизации. Она более известна по аббревиатуре ISO (International Standards Organization).

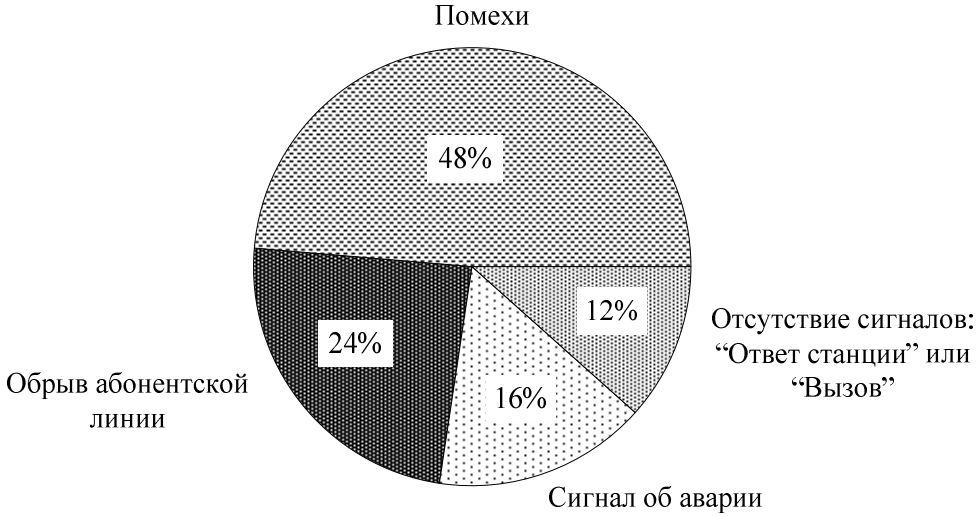


Рисунок 2.6. Причины жалоб абонентов на качество обслуживания

Сбор статистических данных проводился для выявления основных причин, которые вынуждают абонентов жаловаться на качество обслуживание в ТФОП. Следует отметить,

что ISO активно занимается изучением аспектов надежности. Подобные исследования часто выполняются ISO совместно с МЭК.

Обрывы АЛ, как следует из диаграммы, составляют почти четверть всех жалоб, высказанных абонентами. Можно рассматривать только события, которые приводят к невозможности установления соединений, то есть не учитывать жалобы, обусловленные высокими помехами в разговорном тракте. Тогда обрывы АЛ становятся причиной 46% всех отказов в ТФОП. Эта оценка согласуется со статистическими данными, которые приведены для североамериканской телефонной сети в [23].

Вернемся к модели, представленной на рисунке 2.5. С учетом высокой надежности элементов под номерами со второго по восьмой можно упростить эквивалентную схему для расчета коэффициента готовности – рисунок 2.7. В нижней части этого рисунка показана соответствующая модель.

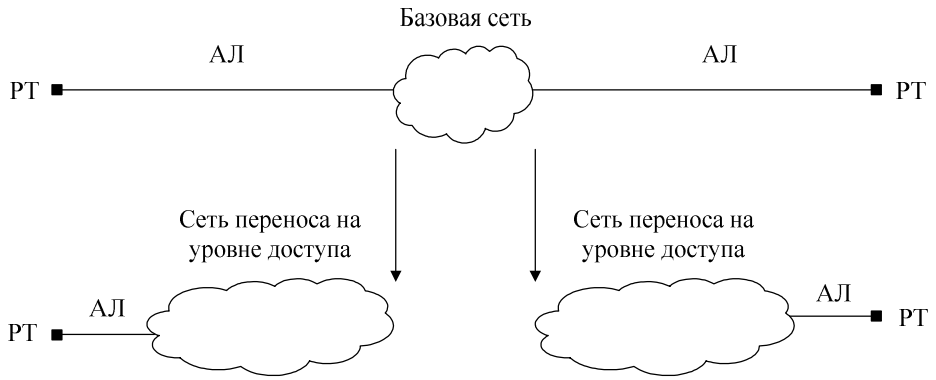


Рисунок 2.7. Модель для оценки коэффициента готовности при разных вариантах построения сети доступа

В некоторых сетях доступа создаются кольца SDH. Они служат для объединения тех выносных модулей (в частности, концентраторов и УАТС), которые подключаются к цифровой МС. Каждое такое кольцо образует сеть переноса на уровне доступа [24, 25]. В англоязычной технической литературе для ее названия был введен термин "Transfer Network".

Обе сети доступа объединяются одним облаком, включающим элементы, которые на рисунке 2.5 имеют номера со второго по восьмой. Это облако названо базовой сетью. Такой термин определен моделью МСЭ, которая приведена на рисунке 1.32 в первой главе монографии. Сети переноса повышают надежность инфокоммуникационной системы. Остается фрагмент сети доступа, который реализован в виде совокупности двухпроводных физических цепей. Именно двухпроводная физическая цепь остается тем элементом инфокоммуникационной системы, который не позволяет достичь высокого значения коэффициента готовности между терминалами, взаимодействующими через сеть связи.

Вероятность того, что тракт обмена информацией между двумя терминалами – P_T находится в работоспособном состоянии, для модели, показанной в нижней части рисунка 2.7, можно оценить следующим образом:

$$P_T = P_{АЛ}^2 P_{СП}^2 P_{БС}. \qquad (2.9)$$

В этой формуле предполагается, что вероятности работоспособного состояния АЛ – $P_{АЛ}$ и сети переноса – $P_{СП}$ одинаковы для левого и правого фрагментов рассматриваемой модели. Величина $P_{БС}$ определяет вероятность работоспособности базовой сети.

Коэффициент готовности на уровне 0,99999 устанавливается для всего тракта обмена информацией. Поэтому для сети доступа должен быть установлен более жесткий уровень коэффициента готовности, что подтверждается формулой (2.9). Диаграмма, приведенная на рисунке 2.6, свидетельствует, что двухпроводная физическая цепь (даже с

меньшей длиной за счет построения сети переноса) может вызывать серьезные проблемы у Оператора, который собирается обеспечить коэффициент готовности на уровне 0,99999.

Возможно, что лучшим способом решения возникающей задачи станет совместное использование двух разных технологий доступа. Первая группа технологий основана на проводных средствах связи. Они включают обычные АЛ, двухпроводные физические цепи, которые уплотняются оборудованием xDSL, каналы систем передачи с разными номиналами пропускной способностью и другие решения. Вторая группа технологий основана на оборудовании, которое использует различные радиотехнические средства связи. Эта группа технологий известна по термину "Wireless Access".

Сети мобильной связи можно рассматривать как средство доступа, обеспечивающее своим пользователям дополнительные возможности. С другой стороны, эти сети можно рассматривать как средства создания резервного направления для доступа в ТФОП. В левой части рисунка 2.8 изображена такая функциональная возможность сети мобильной связи. В правой части предложенной модели показан граф с двумя вершинами, которые соответствуют терминалам пользователя и точке входа в базовую сеть.

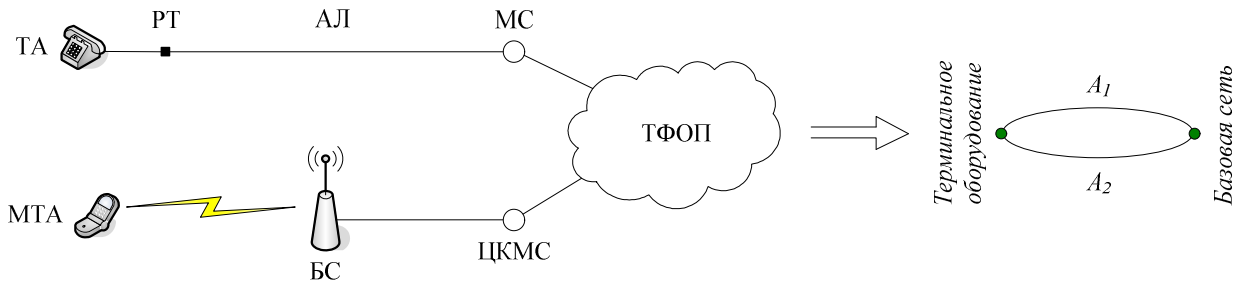


Рисунок 2.8. Резервирование средств доступа

Будем считать, что коэффициент готовности для выхода в ТФОП через средства фиксированного доступа – A_1 нам известен. Резервным направлением становится такой маршрут: МТА (мобильный телефонный аппарат), БС (базовая станция), ЦКМС (центр коммутации мобильной связи). Для этого маршрута также можно оценить коэффициент готовности – A_2. Следует подчеркнуть, что оба варианта выхода в ТФОП не используют общих технических средств. В подобных случаях считается, что маршруты независимы в смысле надежности.

Для оценки коэффициента готовности на участке "терминальное оборудование – базовая сеть" можно воспользоваться вполне логичным предположением о независимости нахождения технических средств, используемых в обоих маршрутах, в работоспособном состоянии. Тогда искомое значение коэффициента готовности – A определяется по такой формуле:

$$A = 1 - (1 - A_1)(1 - A_2). \qquad (2.10)$$

Для оценки роста коэффициента готовности в таблице 2.2 приведены результаты расчета по формуле (2.10). Предполагается, что $A_1 = A_2$. Во втором столбце таблицы указан примерный уровень допустимого времени восстановления (T_{B1} и T_{B2}) в течение года для одного из маршрутов обмена информацией. Предполагается, что $T_{B1} = T_{B2}$.

Таблица 2.2. Изменение коэффициента готовности сети доступа при резервировании

A_1 (A_2)	T_{B1} (T_{B2})	A	T_B
0,9	40 дней	0,99	88 часов
0,99	88 часов	0,9999	52 минуты
0,999	8 часов	0,999999	1 минута
0,9999	52 минуты	0,99999999	0,3 секунды

Практический интерес представляют данные, приведенные в двух нижних строках таблицы 2.2. Очевидно, что беспроводной доступ способен решить задачи обеспечения высоких требований по надежности инфокоммуникационной системы. Такая возможность может использоваться не только для телефонной связи. Ряд современных технологий беспроводного доступа позволяет предоставлять услуги по обмену данными и получению видеоинформации.

Очевидно, что в дальнейшем требования к надежности инфокоммуникационной системы будут ужесточаться. Этот процесс можно представить ступенчатой функцией – рисунок 2.9. В качестве меры надежности использован коэффициент готовности. Для планирования транспортной и коммутируемых сетей необходимо оценить те моменты времени (точки T_X и T_Y по оси "Год"), когда следует ожидать существенные изменения требований к коэффициенту готовности инфокоммуникационной системы. Кроме того, важно знать новые значения для исследуемой величины – A_X и A_Y соответственно. Координаты точек T_X и T_Y, а также значения величин A_X и A_Y указаны на рисунке 2.9 произвольно.

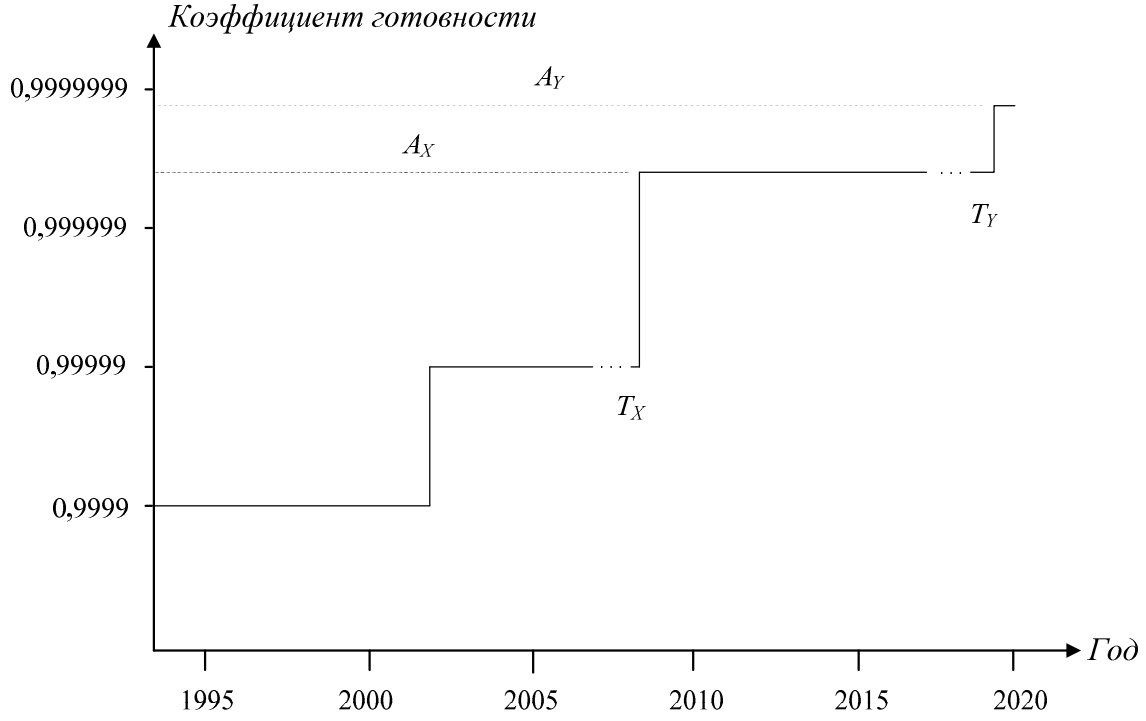


Рисунок 2.9. Качественный прогноз роста коэффициента готовности

При прогнозировании показателей надежности необходимо также учитывать и смену технологий. Переход к обслуживанию речевого трафика по технологии VoIP (речь через сеть, основанную на IP-технологии) связан с пересмотром принципов нормирования для показателей качества обслуживания (включая надежность связи). Прогностическим оценкам, касающимся среды передачи в транспортной сети, посвящен следующий параграф.

2.2.4. Среда передачи

История эволюции среды передачи заслуживает отдельного обсуждения, так как позволяет наглядно проанализировать процессы конвергенции и дивергенции, которые свойственны инфокоммуникационной системе. Подобный анализ не входит в перечень вопросов, рассматриваемых в этой монографии. Поэтому ограничимся лишь изложением принципов эволюции среды передачи в базовой сети и в сети доступа в соответствии с моделью, которая была приведена на рисунке 1.32 в первой главе монографии.

Воздушные линии связи были единственным доступным средством на начальном этапе создания базовой сети. Затем стали строиться кабельные линии, но этот способ развития транспортной сети долгое время использовался только в городах. Применение кабелей связи постепенно распространилось на международные, междугородные и сельские транспортные сети. В это же время стали строиться радиорелейные линии (РРЛ). В некоторых транспортных сетях нашли применение каналы спутниковой связи. Все эти решения будут востребованы и в перспективных транспортных сетях, но с перманентной сменой используемых технологий. В частности, в кабельных линиях связи доминирующей средой стало оптическое волокно, характеристики которого совершенствуются с каждым годом. Постоянно улучшаются эксплуатационные характеристики систем радиорелейной и спутниковой связи.

В течение многих десятилетий, прошедших с ввода в коммерческую эксплуатацию местных телефонных сетей, технологии доступа почти не изменились. Для подключения ТА и других терминалов, рассчитанных на обмен информацией в полосе пропускания канала ТЧ, использовались физические цепи. Сначала эти цепи подвешивались на столбах. Терминалы включались по так называемой схеме "провод – земля", то есть в помещение пользователя было необходимо довести лишь один проводник. Затем стали использовать двухпроводные физические цепи. Воздушные линии связи стали постепенно вытесняться кабельными. Этот процесс практически завершился в городах, но еще продолжается в сельской местности.

За последние десятилетия радикально изменилась ситуация с технологиями доступа. Чем это вызвано? Попытки улучшить эксплуатационные характеристики существующих сетей доступа и снизить затраты на их построение предпринимались и ранее. Однако эффективные решения в силу объективных причин найдены не были [25]. В течение двух последних десятилетий XX века появились реальные возможности применения новых технологий доступа.

Процесс эволюции технологий доступа иллюстрирует рисунок 2.10. Конечно, на этом рисунке представлены не все возможные технологии доступа. Скорее речь идет об основных классах технологий. Следует подчеркнуть, что все кривые демонстрируют лишь качественные изменения в технологиях доступа. Более того, их поведение отражает субъективную точку зрения автора монографии.

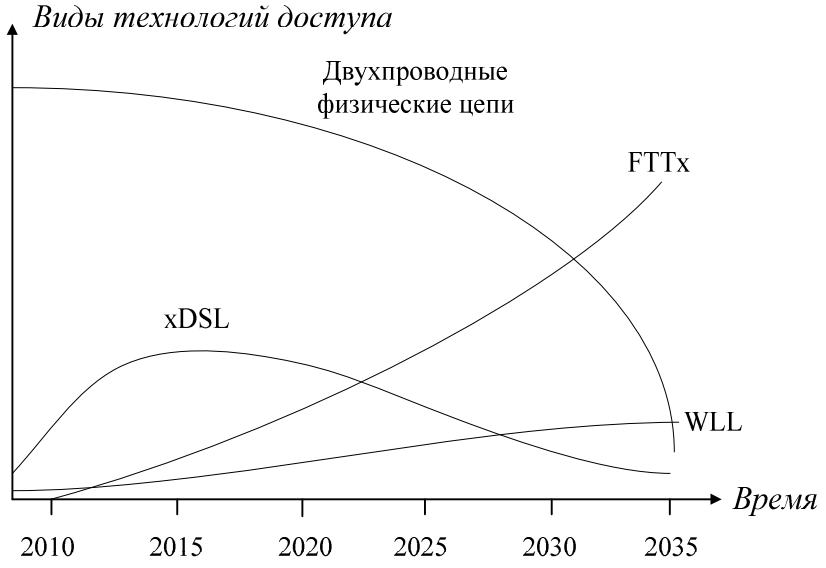


Рисунок 2.10. Эволюция технологий доступа

Двухпроводные физические цепи останутся доминирующим способом организации сети доступа в течение двух ближайших десятилетий. Это объясняется рядом причин, из которых следует выделить два обстоятельства. Во-первых, *"жизненный цикл"* кабелей с медными проводниками составляет несколько десятков лет. В большинстве проектов раз-

вития ГТС и СТС, реализованных в последние годы, подключение пользовательских терминалов осуществлялось за счет двухпроводных физических цепей. Во-вторых, для значительной части пользователей и пропускная способность, которая обеспечивается двухпроводными физическими цепями, и показатели качества передачи информации вполне приемлемы.

Технология xDSL ранее рассматривалась как временное решение задач, связанных с существенным увеличением полосы пропускания сети доступа. Ясно, что после вывода из эксплуатации многопарных абонентских кабелей оборудование xDSL придется заменить другой аппаратурой. Многопарные кабели, по всей видимости, будут еще очень долго эксплуатироваться Операторами ТФОП. По этой причине рассуждения о паллиативном характере технологий xDSL теперь реже встречаются в монографиях и статьях, которые посвящены перспективам развития сетей доступа.

В [25] приведен прогноз использования разных вариантов реализации идеи xDSL. Соответствующий график заимствован из статьи [26], опубликованной в журнале America's Network в 1997 году. Автор прогноза считал, что к 2005 году будет доминировать технология VDSL (цифровая АЛ со сверхвысокой скоростью передачи информации). Рынок оборудования ADSL казался заметно скромнее, но статистические данные последних лет не подтверждают подобные оценки. Пока еще уверенно лидирует технология ADSL. Численность пользователей оборудования xDSL в мире растет намного быстрее, чем предполагалось в [26].

Если xDSL все же остается временным решением для организации широкополосного доступа, то рынок беспроводных технологий рассматривается как прогрессирующий без спада в обозримой перспективе. Средства беспроводного доступа иногда обозначают общей аббревиатурой WLL (Wireless Local Loop). Дословный перевод – беспроводная АЛ – отражает основную идею используемой технологии. В некоторых публикациях вводится сокращение BWA (Broadband Wireless Access), что акцентирует внимание на организации широкополосного доступа. В технической литературе можно встретить и ряд других аббревиатур. На рисунке 2.10 предпочтение отдано сокращению WLL.

В сельской местности технологии WLL позволяют организовать сети доступа, которые отличаются высокой эффективностью для территорий с низкой поверхностной плотностью размещения потенциальных клиентов Оператора. Для сельской местности привлекательность технологий WLL объясняется также причинами эксплуатационного характера [27]. В таких случаях статус беспроводных технологий очевиден. Речь идет о перспективном решении, которое не следует считать временным.

Иная ситуация складывается в тех случаях, когда Оператор использует оборудование беспроводного доступа для оперативного подключения пользовательских терминалов до последующей прокладки кабеля. Такой подход представляется весьма перспективным. Оператор, который способен быстро реализовать требования потенциальных клиентов, получает очевидные конкурентные преимущества.

Третий статус беспроводных технологий – средства резервирования, необходимые для повышения надежности сети доступа. Данный аспект использования беспроводных технологий кратко рассматривался в предыдущем параграфе. Принципы построения сети доступа, в которой реализована такая возможность повышения надежности, изложены в [28]. Метод расчета объема транспортных ресурсов, используемых для резервирования в сетях доступа, приведен в параграфе 2.3.8.

Нижняя кривая на рисунке 2.10 относится к группе технологий, обозначаемой аббревиатурой FTTx – волокно до точки "x". Буква, заменяющая символ "x", указывает на то место, до которого проложен кабель с ОВ. Встречаются такие сокращения:

- FTTA – Fiber To The Apartment (доведение кабеля с ОВ до квартиры);
- FTTB – Fiber To The Building (доведение кабеля с ОВ до здания);
- FTTC – Fiber To The Curb (доведение кабеля с ОВ до места установки кабельного шкафа);
- FTTD – Fiber To The Desk (доведение кабеля с ОВ до рабочего места);

- FTTH – Fiber To The Home (доведение кабеля с ОВ до жилого дома);
- FTTO – Fiber To The Office (доведение кабеля с ОВ до офиса);
- FTTP – Fiber To The Premises (доведение кабеля с ОВ до помещения клиента);
- FTTR – Fiber To The Remote (доведение кабеля с ОВ до удаленного модуля – концентратора, мультиплексора или УАТС).

Проникновение кабеля с ОВ на уровне сетей доступа в первой декаде XXI века происходило медленно. Затем в журналах и в Internet стали публиковаться сведения об амбициозных планах Операторов связи по реализации концепций FTTx.

Для технологий, показанных на рисунке 2.10, практический интерес представляют прогностические оценки, определяющие доли рынка. Актуальность подобных оценок обусловлена высокой ценой ошибок Оператора. В частности, на первом этапе развития доступа по ADSL у некоторых Операторов простаивало до 60% созданных ресурсов, но потом ситуация стала меняться. Статистическая информация о рынке xDSL доступна на одноименном форуме [29].

Жизненный цикл технологии xDSL, по всей видимости, продлится до завершения времени эксплуатации многопарных кабелей. Переход на уровне доступа к кабелям с ОВ и к современным беспроводным технологиям неизбежен. Фактически повторится процесс (с рядом не столь принципиальных отличий), активно идущий в транспортных сетях более высоких уровней иерархии. Сети доступа всегда строили Операторы ТФОП. Ресурсы доступа были в значительной мере использованы для телефонной связи. В начале XXI века ситуация радикально изменилась. В сетях широкополосного доступа доля ресурсов, предназначенных для ТФОП, резко снижается.

На рисунке 2.11 построены три графика, основанные на результатах очень простых расчетов. Кривые иллюстрируют снижение доли транспортных ресурсов, необходимых для телефонной связи, при росте количества пользователей, которые заинтересованы в широкополосном доступе.

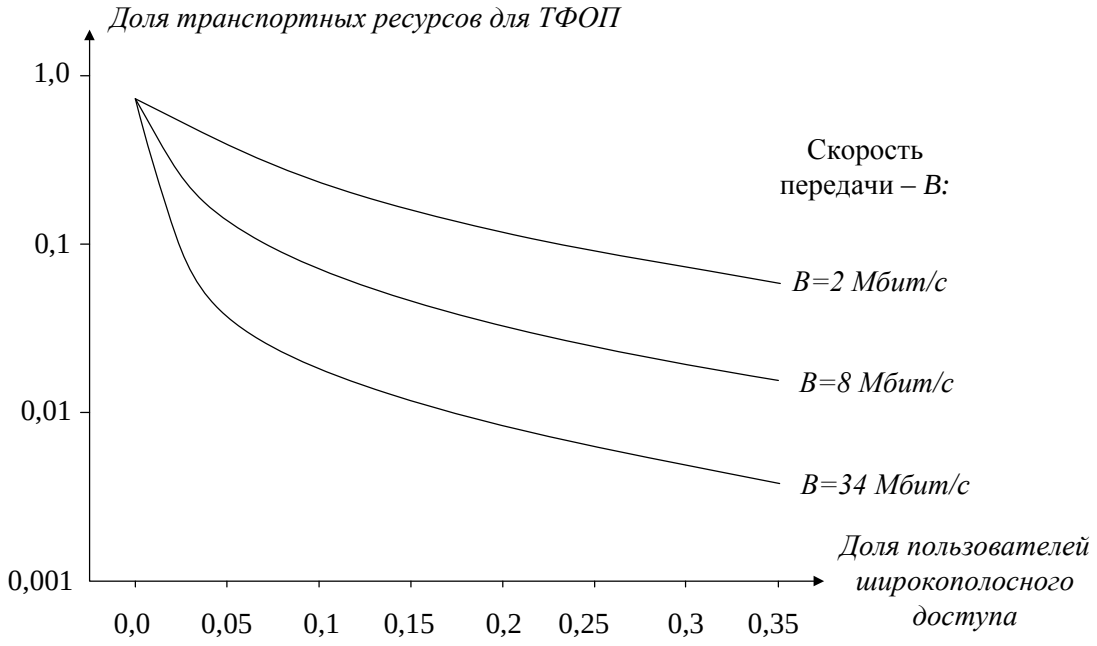


Рисунок 2.11. Доля транспортных ресурсов доступа для телефонной связи

Вычисления проводились для трех номиналов скорости передачи информации на интерфейсе пользователь-сеть: 2, 8 и 34 Мбит/с. Если учесть прогностические оценки, которые были приведены на рисунке 2.3, то становится очевидным следующее: объем транспортных ресурсов, предназначенных для обслуживания трафика речи, вскоре будет оцениваться долями одного процента. С другой стороны следует помнить о важности те-

лефонной связи и необходимости использования технологий доступа, обеспечивающих требуемые показатели качества обслуживания.

Для беспроводных средств доступа проблема с выбором транспортных технологий отсутствует. Ее вид определен выбранным стандартом. Если создается сеть доступа на базе кабеля с ОВ и она предназначена для ССП, то проблема также отсутствует. Следует выбрать технологию, которая ориентирована на обмен IP-пакетами. Эта задача заметно усложняется при формировании оптических колец до перехода к ССП, когда для создания каналов и трактов устанавливается оборудование SDH. В подобных случаях переход к ССП может потребовать замену систем SDH, если они не адаптированы к передаче пакетного трафика [33].

Ни в чем не ошибаться
– это свойство богов.
(Демосфен)

2.3. Сценарии построения транспортной сети

2.3.1. Классификация основных сценариев

Проектировщику обычно приходится рассматривать несколько различных сценариев построения транспортной сети. Эти сценарии целесообразно классифицировать так, чтобы выделить самые важные свойства перспективной коммутируемой сети. На рисунке 2.12 представлен один из возможных способов классификации, опирающийся на три признака, которые существенны для инфокоммуникационной системы в целом.

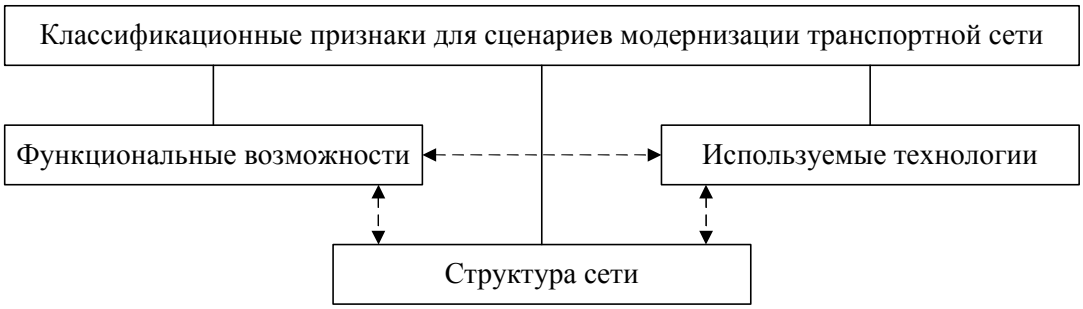


Рисунок 2.12. Классификационные признаки основных сценариев модернизации транспортных сетей

Функциональные возможности транспортной сети следует считать важнейшей из характеристик инфокоммуникационной системы с точки зрения Оператора. Они влияют на структуру транспортной сети и на используемые технологии. Факт этого влияния на рисунке 2.12 отображают пунктирные линии.

Функциональные возможности транспортной сети содержат сведения о потенциале инфокоммуникационной системы с точки зрения предоставления пользователям услуг, ориентированных на широкополосные каналы. В данном случае термин "пользователь" соответствует словосочетанию "end user", который принят в технической литературе на английском языке. К функциональным возможностям относится также и способность транспортной сети наращивать свои ресурсы по мере повышения платежеспособного спроса на широкополосные каналы.

Ряд функциональных возможностей целесообразно рассматривать, оперируя иными категориями. Речь идет о структуре транспортной сети и используемых технологиях. Они определяют надежность коммутируемых сетей, способность поддерживать разные виды соединений и прочие атрибуты инфокоммуникационной системы.

Структура транспортной сети выбирается с учетом разных факторов. Большинство проектов основано на минимизации тех затрат, которые необходимы для построения инфокоммуникационной системы с заданными показателями. Если эта система создается

заново, то могут быть воплощены самые эффективные решения, касающиеся структуры сетей и используемых технологий. Такие проекты – большая редкость. Обычно Оператору приходится решать задачи модернизации эксплуатируемых коммутируемых сетей. В подобных случаях существует ряд ограничений, которые, в первую очередь, касаются структуры транспортной сети.

Два характерных примера такой ситуации иллюстрирует рисунок 2.13. В левой части модели гипотетического пристанционного участка аналоговой МС сети показаны три направления кабельной канализации, использовавшиеся для построения магистральных участков абонентской сети. В правой части рассматриваемой модели показаны четыре такие же направления. Различие двух фрагментов эксплуатируемой сети доступа состоит в возможности организации колец SDH. Предполагается, что данная технология выбрана Оператором в качестве перспективной. Точки окончания каждого магистрального участка пронумерованы арабскими цифрами. Развитие сети доступа подразумевает появление еще двух таких точек – под номерами 8 и 9.

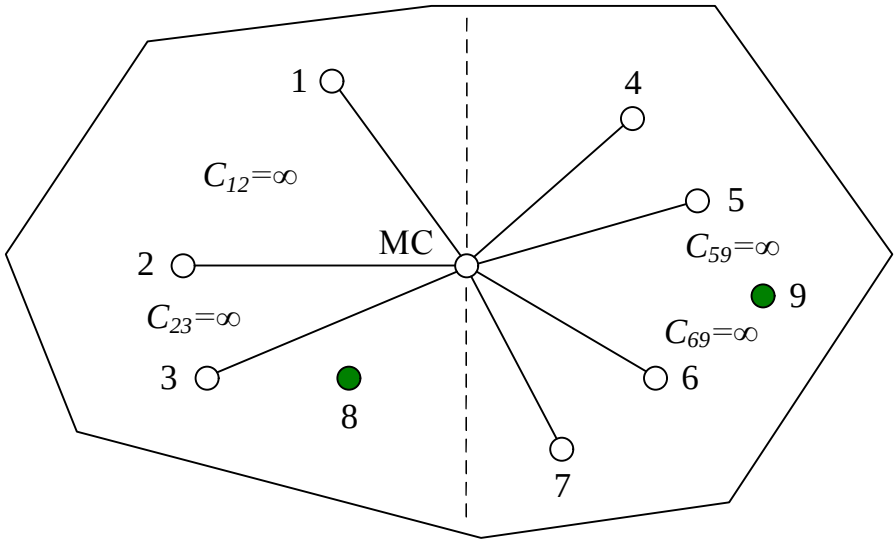


Рисунок 2.13. Модель магистральных участков эксплуатируемой сети доступа

Запись вида $C_{ij} = \infty$ означает, что затраты на организацию соответствующей линии передачи настолько велики, что "замкнуть" кольцо SDH не представляется возможным. Подобная ситуация обычно связана с тем, что проведение работ по прокладке новой кабельной канализации не допускается по каким-либо соображениям.

В результате реализации проекта формируется транспортная сеть, структура которой показана на рисунке 2.14. Кольца SDH не охватывают все точки, в которых заканчивается магистральный участок сети доступа. Для СУ, находящихся в точках 1, 2 и 9, необходимо предусмотреть специальные меры для обеспечения требуемой величины коэффициента готовности на уровне сети доступа. Таким образом, прокладка на всех магистральных участках кабеля с ОВ не решает задачу создания отказоустойчивой сети доступа. Чаще всего такое положение объясняется отсутствием в ряде сетей доступа линий межшкафной связи [34]. Данный термин соответствует словосочетанию *"Link cable"* в англоязычной технической литературе. Кстати, отказ от межшкафных связей можно считать одним их характерных примеров отступлений от международной практики. Нестандартные решения в части систем сигнализации и нумерации уже продемонстрировали сложность задач, которые возникают в процессе развития ТФОП.

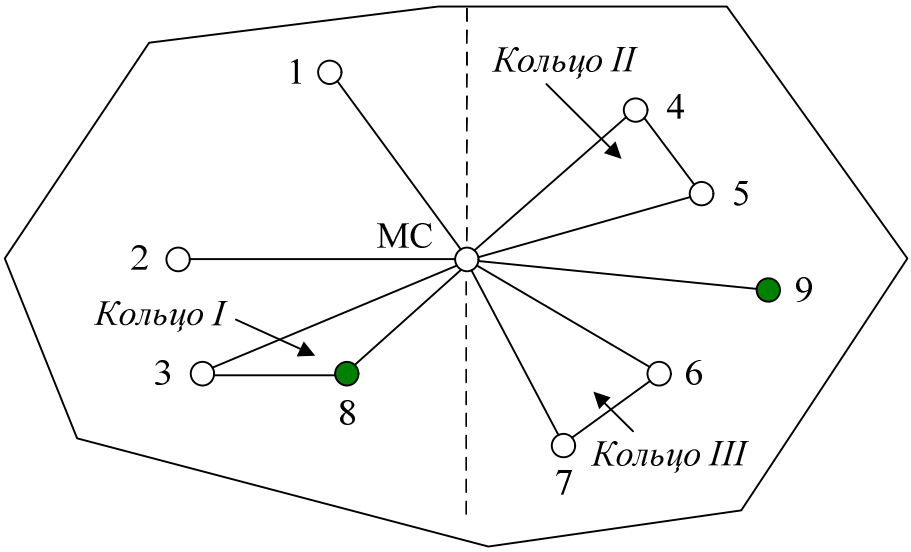


Рисунок 2.14. Результаты модернизации сети доступа

Теперь стали очевидны потенциальные проблемы с построением надежных сетей доступа. Для магистральных участков с номерами 1, 2 и 9 может использоваться решение, называемое *"плоским кольцом"* [35]. Особенность "плоского кольца" состоит в том, что оно позволяет обеспечить высокую надежность транспортной сети при отказах, которые происходят в оборудования SDH, но не способно решить проблемы при обрыве кабеля.

В трех следующих параграфах рассматриваются сценарии построения транспортной сети. Они различаются классификационными признаками, выбранными в соответствии с моделью, показанной на рисунке 2.12. Подобное разделение сценариев следует считать условным. Оно, тем не менее, позволяет упростить решение некоторых практических задач, касающихся планирования телекоммуникационных сетей.

2.3.2. Сценарии, различающиеся функциональными возможностями

Можно выделить два сценария, различающиеся функциональными возможностями. Первый сценарий – создание транспортной сети, которая обеспечивает ресурсы только для телефонной связи. Это означает, что бизнес Оператора ограничен услугами, которые базируются на технологии "коммутация каналов" и подразумевают применение каналов ТЧ или ОЦК. Второй сценарий построения транспортной сети реализуется в том случае, когда Оператор ориентируется на максимально широкий спектр поддерживаемых услуг. С точки зрения объема транспортных ресурсов можно говорить об услугах типа triple-play service [36]. Понятно, что подобный выбор Оператора требует перехода к технологии коммутации пакетов и использования мощных транспортных ресурсов. Большинство промежуточных сценариев можно представить двумя решениями Оператора относительно своей роли на инфокоммуникационном рынке:

- поддержка услуг телефонной связи и обмена данными;
- обеспечение системы КТВ и услуг высокоскоростного доступа в Internet.

Все эти сценарии могут основываться на идентичных структурах транспортной сети и одинаковых технологиях. Например, три кольца, показанные на рисунке 2.14, подходят для построения транспортной сети, предназначенной как для телефонии, так и для услуг triple-play service. Различие будет заключаться в скоростях обмена информацией по кольцу. Отдельного анализа заслуживает проблема обеспечения надежности транспортной сети, кратко изложенная в параграфе 2.2.3. Для транспортной сети, которая служит фундаментом для услуг triple-play service, требования к надежности должны быть весьма жесткие. Отказ транспортной сети приводит к полной потере всех коммуникационных возможностей: нет ни телефонной связи, ни Internet, ни телевидения, ни звукового вещания.

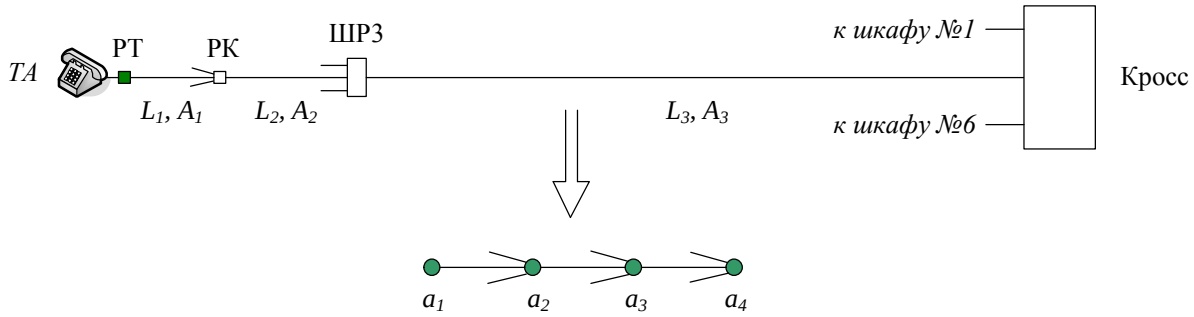
Задачи выбора одного сценария среди множества решений, различающихся своими функциональными возможностями, можно свести к анализу кривых $NPV(t)$. Этот анализ обычно предшествует процессу декомпозиции инфокоммуникационной системы, то есть переходу к задачам, касающимся построения транспортной сети.

2.3.3. Сценарии, различающиеся структурой транспортной сети

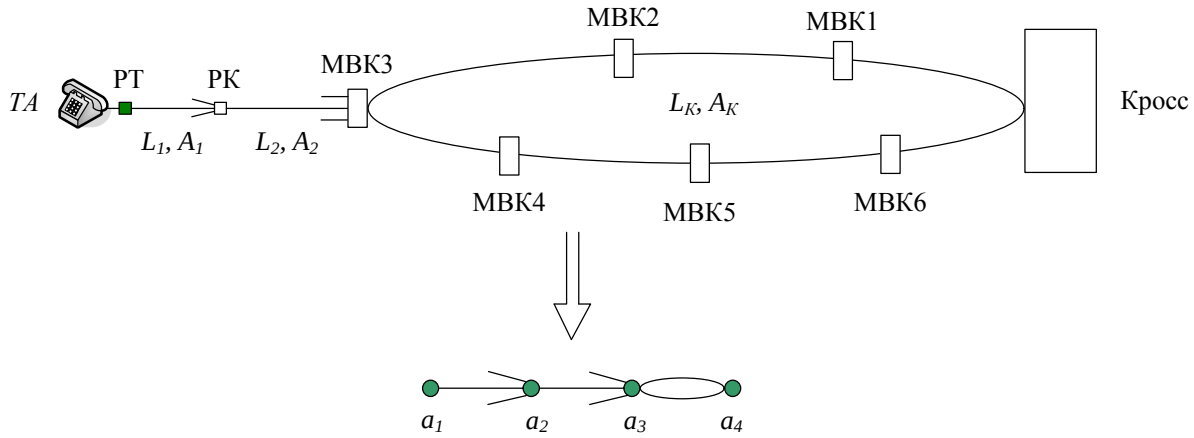
Структура транспортной сети определяет ряд технико-экономических показателей инфокоммуникационной системы в целом. В частности, суммарная длина кабельных трасс, надежность связи, функциональные требования к оборудованию СУ, возможность введения некоторых новых видов услуг зависят от выбранной структуры сети.

При построении и развитии современных транспортных сетей обычно используются топологии следующих видов: полносвязная, кольцевая, древовидная и звездообразная. Другие структуры транспортных сетей встречаются реже. Иногда в транспортной сети на одном уровне иерархии реализуются структуры нескольких видов.

На рисунке 2.15 показаны графы, соответствующие структурам транспортной сети доступа. Для всех графов использовано предположение о наличии нескольких участков в сети доступа, что соответствует используемым ранее принципам организации АЛ [37].



а) Структура эксплуатируемой сети доступа и модель АЛ в виде графа



б) Структура перспективной сети и модель АЛ в виде графа

Рисунок 2.15. Структуры транспортной сети доступа и соответствующие графы

Каждый участок характеризуется своей длиной – L_j и коэффициентом готовности – A_j. Если какой-либо участок в сети доступа отсутствует, его длина считается нулевой, а коэффициент готовности – равным единице. В частности, в границах ЗПП никогда не устанавливаются шкафы. Это означает, что $L_3 = 0$, а $A_3 = 1$.

Вариант (а) иллюстрирует принципы построения транспортной сети, принятые на этапе формирования аналоговых ГТС и СТС [37]. Сеть доступа представляла собой совокупность АЛ. Подобный способ построения сети доступа отличается минимальной надежностью, что свойственно древовидной топологии [16, 17]. Граф с древовидной структурой, показанный в верхней части рисунка 2.15, содержит четыре вершины. Они соответствуют следующим четырем элементам сети доступа: a_1 – телефонная розетка, a_2 – распределительная коробка, a_3 – распределительный шкаф, a_4 – кросс коммутационной станции.

Наиболее протяженный участок сети доступа – магистральный [25, 37]. Обычно с этого участка начинается модернизация сети доступа, основная идея которой заключается в прокладке кабеля с ОВ. По возможности такой кабель прокладывается так, чтобы формировались кольца, обеспечивающие высокую надежность магистрального участка сети доступа. Вариант (б) иллюстрирует модель, образующуюся в результате построения кольца на магистральном участке. В это кольцо включено шесть МВК. Длина кольца и коэффициент готовности обозначены как L_K и A_K соответственно. Очевидно, что $L_K > L_3$, а $A_K >> A_3$.

Граф транспортной сети доступа для рассматриваемой модели содержит два ребра между вершинами a_3 и a_4. Эти ребра не имеют общих элементов, что обеспечивает высокую надежность связи вершин a_3 и a_4. С практической точки зрения это означает, что магистральный участок способен обеспечить высокие показатели надежности связи. Такое решение не гарантирует высокий коэффициент готовности на остальных участках сети доступа. Формирование колец на распределительном участке сети доступа нельзя считать практически значимым решением за исключением редких специфических ситуаций. Повышение надежности за пределами магистрального участка может быть достигнуто за счет применения альтернативных сред распространения сигналов [38]. Такой подход представляется реальной возможностью быстрого и эффективного решения проблем, связанных с обеспечением высокого уровня коэффициента готовности, который определен в современных соглашениях об уровне обслуживания – SLA [10, 11].

Совокупность идентичных структур иногда образует новую топологию. В частности, несколько смежных колец формируют топологию, которая очень похожа на сотовую. На рисунке 2.16 приведен пример построения транспортной сети для некой гипотетической инфокоммуникационной системы. Эта сеть образована тремя кольцами одного уровня иерархии. Для надежной связи между кольцами выделены общие СУ, которые обозначены буквами X, Y и Z.

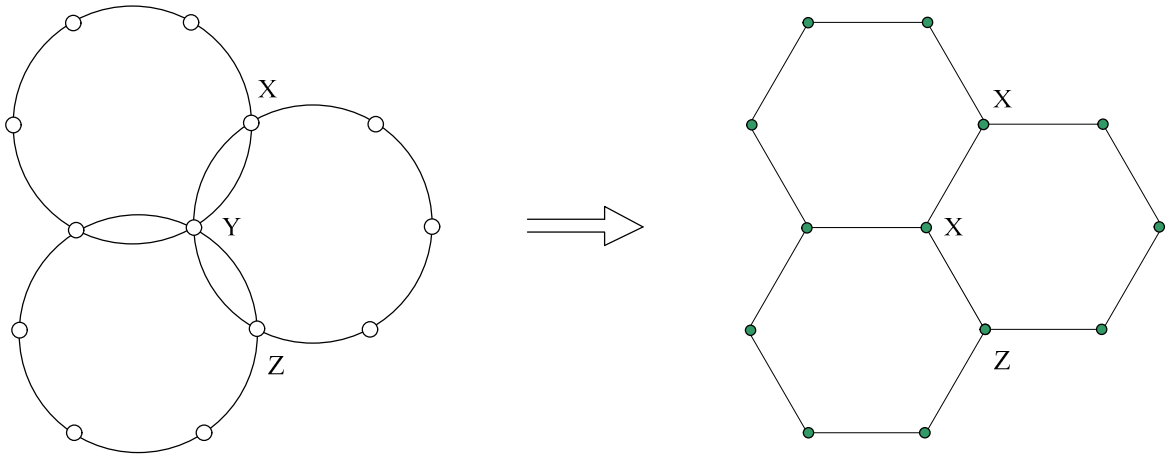


Рисунок 2.16. Формирование сотовой структуры в транспортной сети

В правой части рисунка 2.16 показан граф, соответствующий выбранной структуре транспортной сети. Этот граф имеет сотовую топологию. Данный факт может считаться

характерным примером конвергенции структур двух транспортных сетей разного рода – фиксированной и мобильной. Общие свойства (например, топологическое сходство) формируются в процессе эволюции сетей фиксированной и мобильной связи. Следует учитывать, что переход к кольцевым структурам в сетях доступа – сложная задача из-за тех решений, которые были приняты несколько десятилетий назад при строительстве кабельной канализации. Как уже отмечалось выше, полноценные линии межшкафной связи, позволяющие реализовывать кольца, предусматривались не везде.

2.3.4. Сценарии, различающиеся используемыми технологиями

Каждый сценарий построения или развития инфокоммуникационной системы основан на использовании тех технологий, которые позволяют эффективно поддерживать весь спектр услуг, предусмотренных лицензиями на Операторскую деятельность. Все технологии, выбранные Оператором, удобно рассматривать с помощью семиуровневой модели взаимодействия открытых систем [39, 40]. Основной интерес представляют три нижних уровня этой модели: *физический* (Physical Layer), *канальный* (Data Link Layer) и *сетевой* (Network Layer).

На физическом уровне важно обеспечить возрастающие требования к скорости обмена информацией, что требуется некоторым группам пользователей. Модернизация эксплуатируемых линейных сооружений основана на прокладке кабелей с ОВ и/или установке БС, которые обеспечивают беспроводной широкополосный доступ. Эти две технологии могут быть как конкурирующими, так и дополняющими друг друга. Кроме того, они могут (и, как правило, будут) сосуществовать только на уровне сетей доступа с эксплуатируемыми многопарными кабелями. В течение многих лет будут использоваться и новые многопарные кабели [41], которые отвечают всем требованиям перспективной инфокоммуникационной системы. Конечно, многопарные кабели не могут применяться в тех случаях, когда пользователям необходимы транспортные ресурсы, оцениваемые сотнями мегабит в секунду.

Кабели с ОВ инвариантны к технологиям канального уровня. Это утверждение не всегда справедливо для систем широкополосного беспроводного доступа. Дело в том, что некоторые типы оборудования беспроводного широкополосного доступа представляют собой единый комплекс, в котором нельзя поменять технологию на канальном уровне. С этой точки зрения кабель с ОВ предпочтительнее. Он допускает любые изменения на канальном и сетевом уровнях.

Самые существенные различия сценариев построения транспортной сети характерны для третьего уровня. Можно выделить три типичных сценария, свойственные периоду перехода к ССП: коммутация каналов, коммутация пакетов и комбинированный способ распределения информации (использование обоих видов коммутации). Выбор каждого сценария определяется стратегическими целями Оператора.

2.3.5. Типичные сценарии модернизации транспортных сетей

Для анализа типичного сценария модернизации транспортных сетей целесообразно рассмотреть пристанционный участок современной цифровой МС. Его модель показана на рисунке 2.17. Цифровая МС1 обслуживает абонентов, терминалы которых включены в пять концентраторов и четыре УАТС. Нумерация выносных модулей цифровой МС выбрана так, чтобы можно было идентифицировать все кольца и СУ, используемые для включения концентраторов и УАТС. При включении УАТС в концентратор ее номер определяется последней цифрой. Все предшествующие символы повторяют номер концентратора. Цифра "0" в номере 103, присвоенном УАТС, означает, что включение этого выносного модуля осуществляется непосредственно в МС (то есть, минуя выносной концентратор).

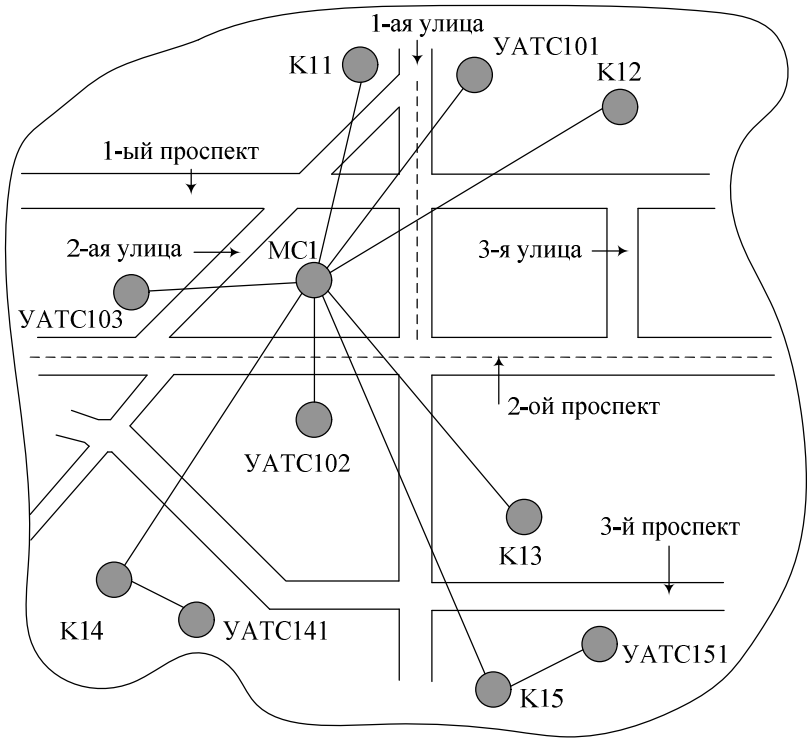


Рисунок 2.17. Модель пристанционного участка цифровой коммутационной станции

На рисунке 2.18 показан первый вариант построения транспортной сети для МС1. Он основан на формировании четырех колец. Такую структуру в некоторых публикациях называют "ромашкой". В левой части рисунка изображена та часть пристанционного участка, которая находится слева от первой улицы. Все основные трассы прохождения кабельной канализации "привязаны" к проспектам и улицам. В правой части рисунка изображена модель пристанционного участка в полном объеме.

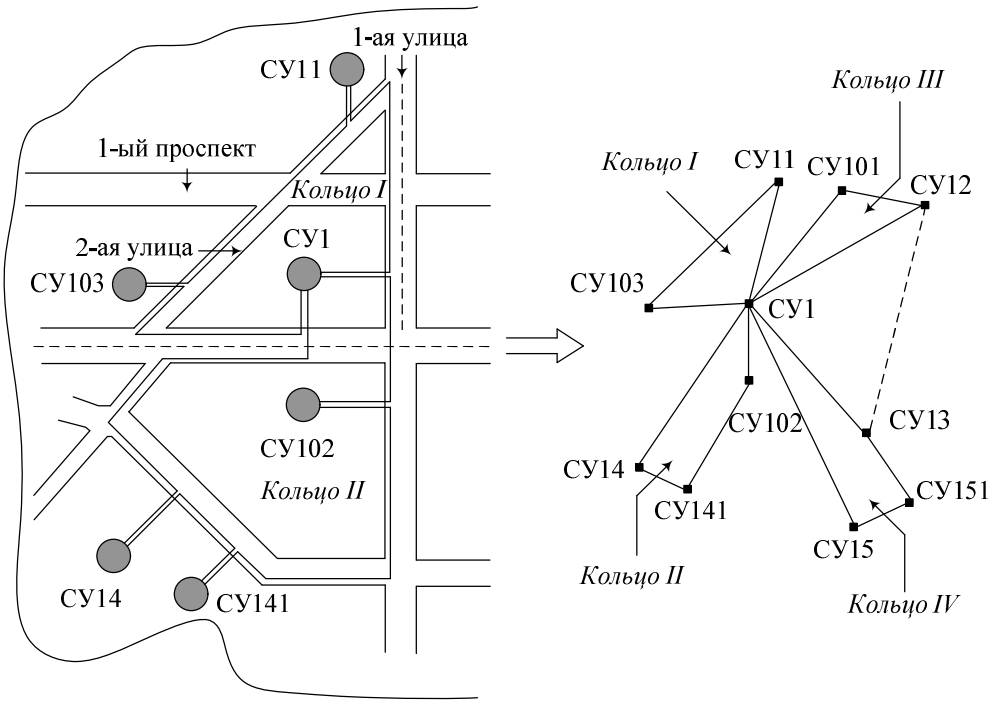


Рисунок 2.18. Первый вариант построения транспортной сети доступа для МС1

Учитывая терминологию, принятую для транспортных сетей, сокращение "МС1" заменено аббревиатурой "СУ1". Вместо используемых концентраторов и УАТС показаны соответствующие СУ с сохранением нумерации. Для рассматриваемой модели выбрана

топология с четырьмя кольцами. Это предположение следует считать условным. Аспекты выбора оптимального числа колец обсуждаются ниже.

Пунктирной линией между СУ12 и СУ13 обозначена связь двух колец. Подобные решения повышают надежность транспортной сети. Возможность их практической реализации может быть ограничена сложившейся топологией кабельной канализации. При построении сети доступа в зонах новой застройки линии передачи между кольцами могут оказаться эффективным средством поддержки высоких показателей надежности связи. Это утверждение справедливо не только для сетей доступа. Линии передачи между кольцами в транспортных сетях всех уровней иерархии позволяют существенно повысить надежность инфокоммуникационной системы в целом вне зависимости от применяемых технологий передачи и коммутации.

Предполагается, что все четыре кольца организованы за счет прокладки кабеля с ОВ. Применение цифрового коммутационного оборудования, как правило, сопровождается созданием транспортных ресурсов за счет установки оборудования SDH. Для новых коммутируемых сетей, которые основаны на пакетных технологиях, использование оборудования SDH может оказаться не самым лучшим решением. Существенно то, что прокладка кабеля с ОВ также будет основана на кольцевых топологиях, инвариантных к технологии передачи.

Второй вариант построения сети доступа, который предусматривает организацию двух концентрических окружностей, показан на рисунке 2.19. Трассы прокладки кабеля "не привязаны" к проспектам и улицам, чтобы не загромождать рисунок. Пунктирными линиями между СУ1 и СУ12, а также между СУ1 и СУ103 показаны направления, которые обеспечивают связь МС1 с выносными модулями внешнего кольца. Отнесение каждого СУ к одному из двух колец выполнено условно. Правила, позволяющие выбрать наилучший вариант включения каждого СУ, приведены в параграфе 2.3.6.

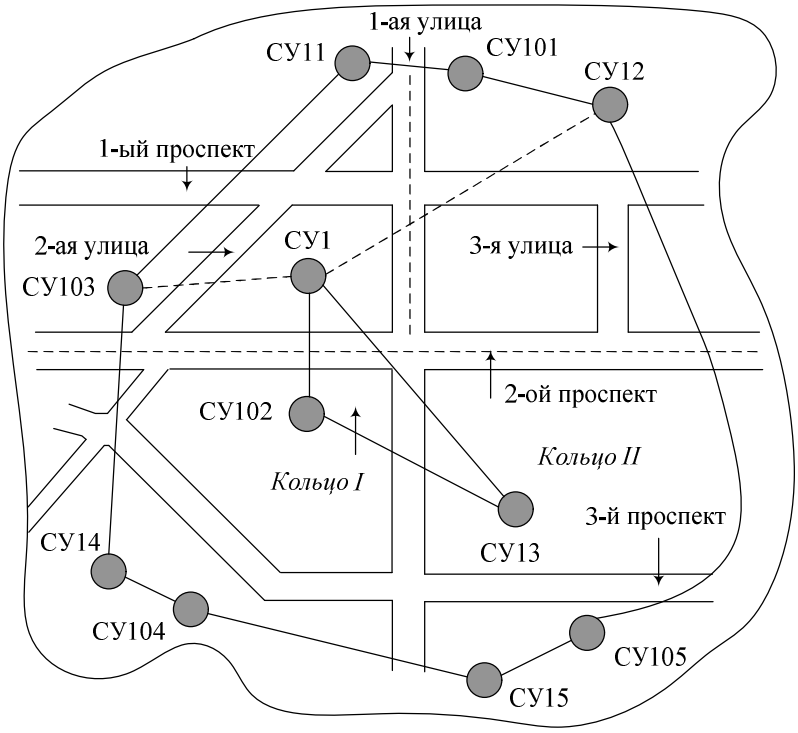


Рисунок 2.19. Второй вариант построения транспортной сети доступа для МС1

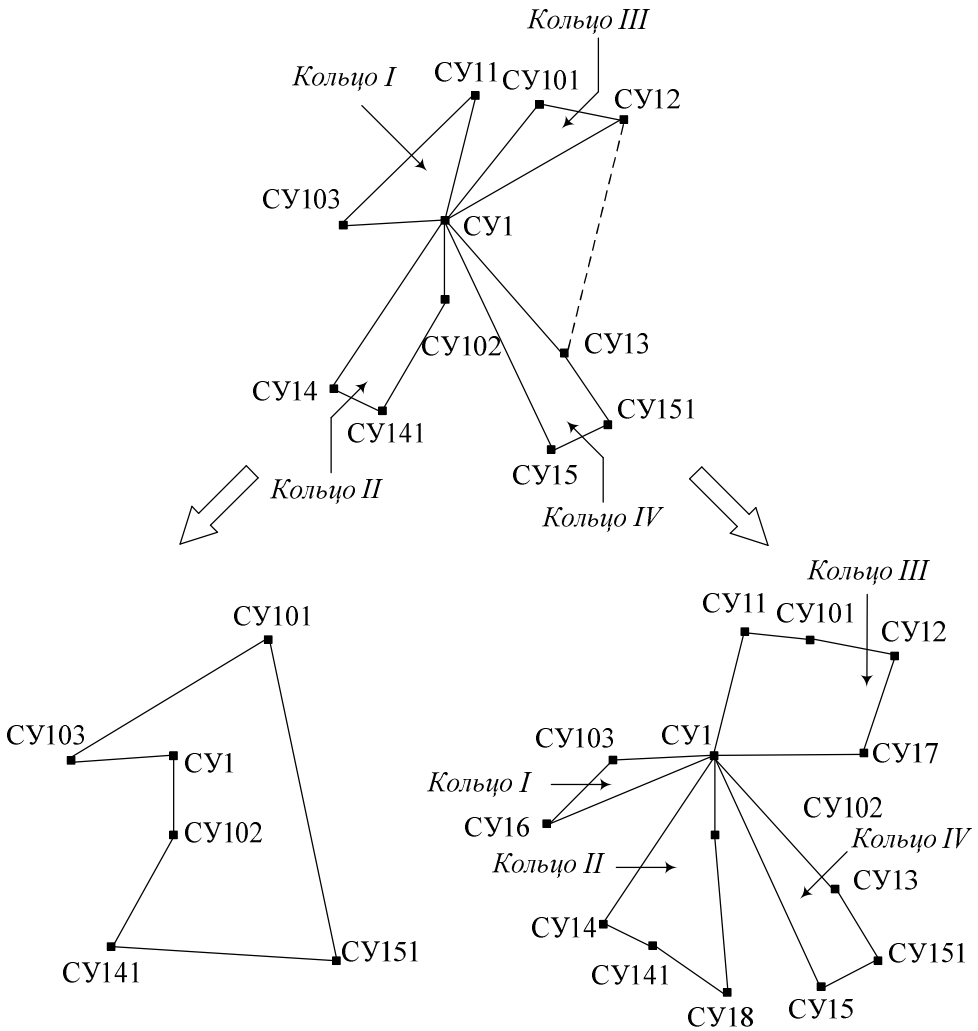
Точки расположения узлов транспортной сети определяются местами размещения МС и ее выносных модулей. Считается, что соответствующие площадки были ранее выбраны по критерию минимума капитальных затрат на создание транспортной и коммутируемых сетей. В подобных случаях обычно говорят об оптимальной структуре соответствующих сетей. Совокупность выносных модулей в сети, которая использует технологию

"коммутация каналов", можно представить в виде множеств: $\{H_C\}$ и $\{G_C\}$. Множество $\{H_C\}$ связано с выносными модулями МС. Как правило, они представлены выносными концентраторами. Множество $\{G_C\}$ определено для УАТС.

При формировании ССП осуществляется переход к технологии "коммутация пакетов". Совокупность выносных модулей в сети, ориентированной на эту технологию, также можно представить в виде двух множеств: $\{H_P\}$ и $\{G_P\}$. Множества $\{G_C\}$ и $\{G_P\}$ совпадают, так как они определяются не технологией коммутации, а числом предприятий и местами их размещения. Иная ситуация складывается с множествами $\{H_C\}$ и $\{H_P\}$. В общем случае, можно утверждать, что возможны две ситуации:

$$\{H_C\} \subset \{H_P\} \text{ и } \{H_P\} \subset \{H_C\}. \qquad (2.11)$$

Это значит, что необходимо исследовать возможные структуры транспортной сети с точки зрения ее способности к адаптации при изменениях различной природы (новые технологии передачи и коммутации, другие структуры сети и тому подобное). Два варианта построения транспортной сети для ССП, которые не противоречат условиям (2.11), показаны на рисунке 2.20.



а) Первая структура транспортной сети б) Вторая структура транспортной сети

Рисунок 2.20. Два варианта построения транспортной сети для коммутации пакетов

В верхней части этого рисунка показана структура транспортной сети, выбранная для технологии "коммутация каналов". Она была приведена ранее в правой части рисунка 2.18. Ниже изображены два варианта построения транспортной сети, которые могут быть

оптимальными для технологии "коммутация пакетов". Они различаются числом используемых СУ.

Для обеих структур транспортной сети численность СУ, которые расположены на территории предприятий, одинакова – пять узлов. Первая структура не содержит никаких выносных модулей. Транспортная сеть строится в виде одного кольца. Она содержит на пять узлов меньше, чем транспортная сеть, которая была оптимизирована для технологии "коммутация каналов". Вторая структура содержит восемь выносных модулей. Это на три узла больше, чем в составе транспортной сети, рассчитанной для технологии "коммутация каналов". Подобные различия могут возникать вследствие технических особенностей аппаратно-программных средств, использованных в коммутаторах пакетов. Кроме того, важнейшим фактором остается стоимость аппаратно-программных средств, зависящая от их пропускной способности.

Основные задачи, которые необходимо решить при подготовке предложений для модернизации транспортных ресурсов, представлены на рисунке 2.21. Одно из важнейших решений, влияющих практически на все системные положения, – это выбор технологий, которые целесообразно использовать для модернизации транспортной сети. Этот выбор может быть сделан только после анализа путей развития коммутируемых сетей.

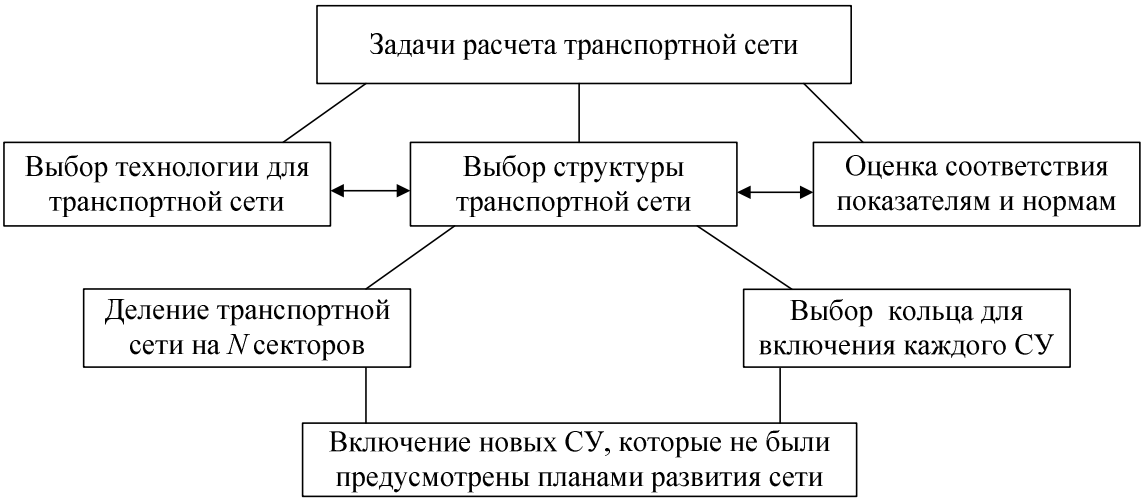


Рисунок 2.21. Задачи расчета транспортной сети

Следующая задача в значительной мере определяется технологией, выбранной для модернизации транспортной сети. Она заключается в синтезе структуры транспортной сети. В данном случае также необходимо знать требования, которые формируют коммутируемые сети. Будем считать, что эти требования – для сети доступа – заданы в виде двух матриц, определяющих места размещения выносных модулей и необходимые величины пропускной способности линий передачи. В предыдущем разделе были предложены две модели транспортной сети, которые основаны на совокупности N колец или же на двух концентрических окружностях. Для первой модели актуально определение числа N, а для второй – выбор того кольца, в которое следует включить каждый СУ.

Важной задачей следует считать определение соответствия характеристик каждого из возможных вариантов построения транспортной сети заданным показателям. Для решения подобных задач необходимо анализировать те структуры, которые могут быть предложены для реализации транспортной сети.

В нижней части рисунка 2.21 сформулирована одна из весьма важных практических задач. Она связана с поиском вариантов включения тех вновь появляющихся СУ (для размещения концентраторов, УАТС и других выносных модулей), которые не были предусмотрены планами развития инфокоммуникационной системы. Методологические основы для решения подобных задач были изложены в последнем разделе первой главы монографии.

На рисунке 2.22 показан пример деления территории пристанционного участка МС1 на сектора. Предполагается, что организация трех секторов – оптимальное решение для рассматриваемой сети доступа. Для расчетов важна информация о местах расположения МС1, ее выносных модулей и устройств распределения информации всех остальных (не относящихся к телефонной) коммутируемых сетей. В данном параграфе используется модель с двумя центрами коммутации пакетов (ЦКП11 и ЦКП12) и одним узлом сети кабельного телевидения (КТВ11). Для этих узлов необходимо выделить транспортные ресурсы до кросса МС1, через который они будут соединены с узлами более высокого уровня иерархии соответствующих коммутируемых сетей.

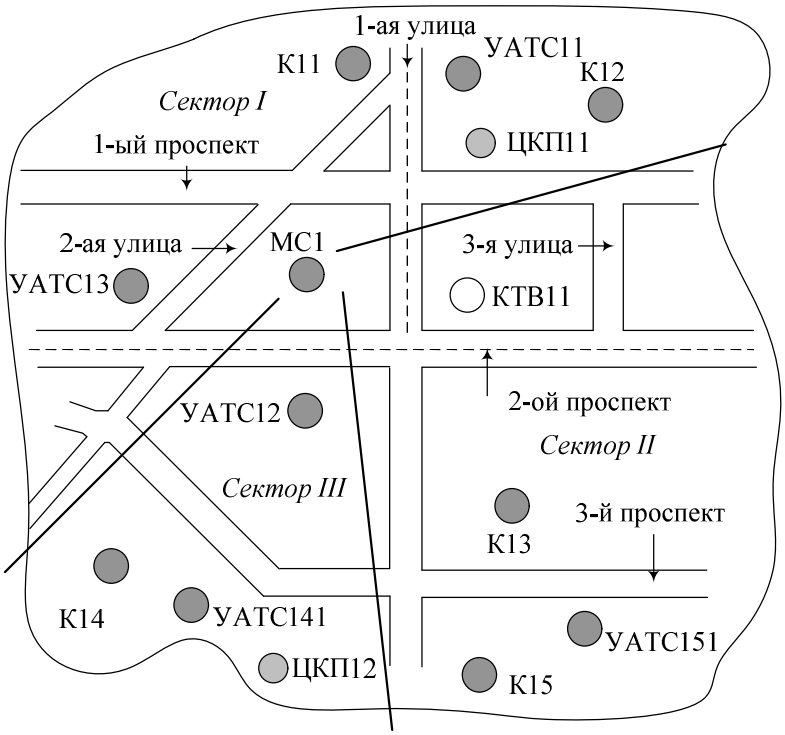


Рисунок 2.22. Пример выделения секторов в транспортной сети

Допустим, что деление территории пристанционного участка на сектора, с точки зрения теории, выполнено оптимально. На практике такое решение может оказаться нереализуемым. На рисунке 2.22 пунктиром показаны границы пристанционных участков трех аналоговых МС. Вместо них будет установлена одна цифровая МС. Для этих трех участков ранее были выбраны – возможно, далеко не лучшим образом – структуры сетей доступа. Кабельная канализация была проложена так, что все многопарные кабели заканчивались в кроссах аналоговых станций. С практической точки зрения ревизия почти всех решений, принятых ранее, не представляется возможной. Для разработки некоторых теоретических положений такой *пересмотр* проектных решений может оказаться очень полезным.

Схемы трасс для сети доступа, которые можно реализовать для МС1, заменяющей три аналоговые МС, показаны на рисунке 2.23. Между этими тремя станциями была проложена кабельная канализация. На площадке одной из аналоговых станций будет устанавливаться МС1. В двух зданиях, где ранее были расположены демонтированные станции, размещены концентраторы – К12 и К13. В этом случае меняются номера выносных модулей, расположенных на площадках демонтированных МС. Для включения выносных модулей других коммутируемых сетей (ЦКП11, ЦКП131 и КТВ11) придется прокладывать новые трассы. Они показаны на рисунках пунктирными линиями. Над этими линиями, кроме направления между МС1 и КТВ11, поставлены знаки "?". Они подчеркивают тот факт, что оптимальные трассы для прокладки кабельной канализации еще не выбраны.

Для упрощения дальнейших рассуждений предполагается, что площадки для размещения концентраторов К11, К131 и К132, а также всех УАТС были определены заранее.

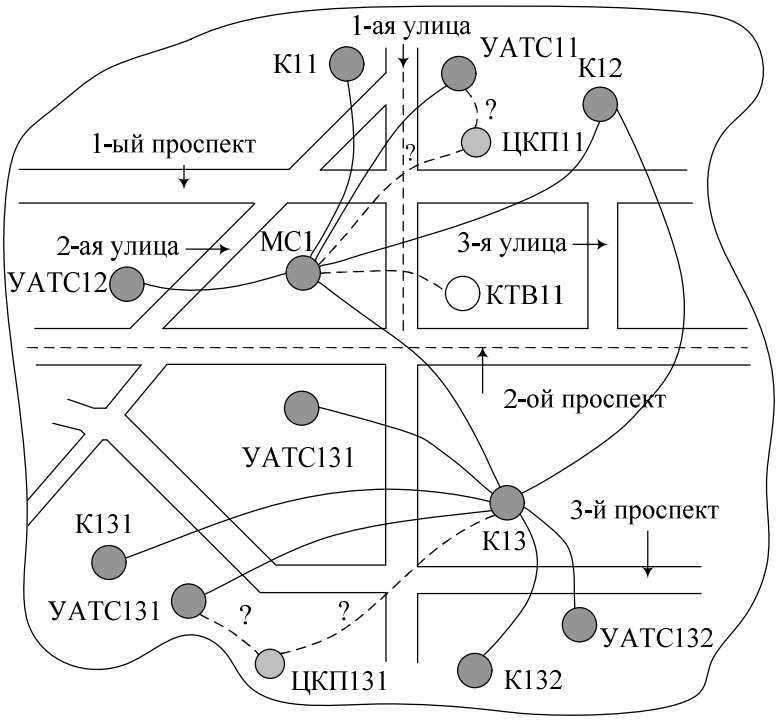


Рисунок 2.23. Построения сети доступа при демонтаже трех аналоговых станций

Сеть, изображенная на рисунке 2.23, содержит только одно кольцо (МС1 – К12 – К13), которое формируется при объединении трех пристанционных участков. Обычно для организации этого кольца не требуется проведение каких-либо сложных работ. Такое утверждение основывается на типичной ситуации. Между кроссами трех коммутационных станций были проложены трассы кабельной канализации, срок службы которой еще не исчерпан.

Для ряда направлений могут быть созданы "плоские" кольца [42, 43]. Целесообразно рассматривать два вида задач, касающихся выделения секторов:

- все СУ могут быть объединены в кольца (такая ситуация характерна для сети доступа, создаваемой впервые);
- из всей совокупности имеющихся СУ в кольца может объединиться только часть узлов – η.

Решение первой задачи предложено, например, в [44]. Очевидно, что практический интерес представляют задачи, для которых справедливо неравенство $0 < \eta < 1$. Речь идет о детализации модели, которая была показана на рисунке 2.22.

Пристанционный участок, показанный на рисунке 2.24, содержит ряд тех деталей, которые полезны с точки зрения более подробного анализа возможных путей развития сетей доступа. Рядом с каждым элементом коммутируемой сети курсивом указан номер СУ. Нумерация СУ выполнена так, чтобы перейти далее к матричной форме описания характеристик транспортной сети. Для трех СУ указаны причины, по которым новые трассы линий передачи не могут быть реализованы: парк, река и пруд. В подобных случаях можно считать, что стоимость работ по организации линий передачи чрезмерно велика. Это позволит существенно упростить постановку задачи. Представляется логичным подход, который заключается в максимально допустимом ограничении совокупности возможных трасс новой канализации и, соответственно, направлений, по которым будет проложен кабель.

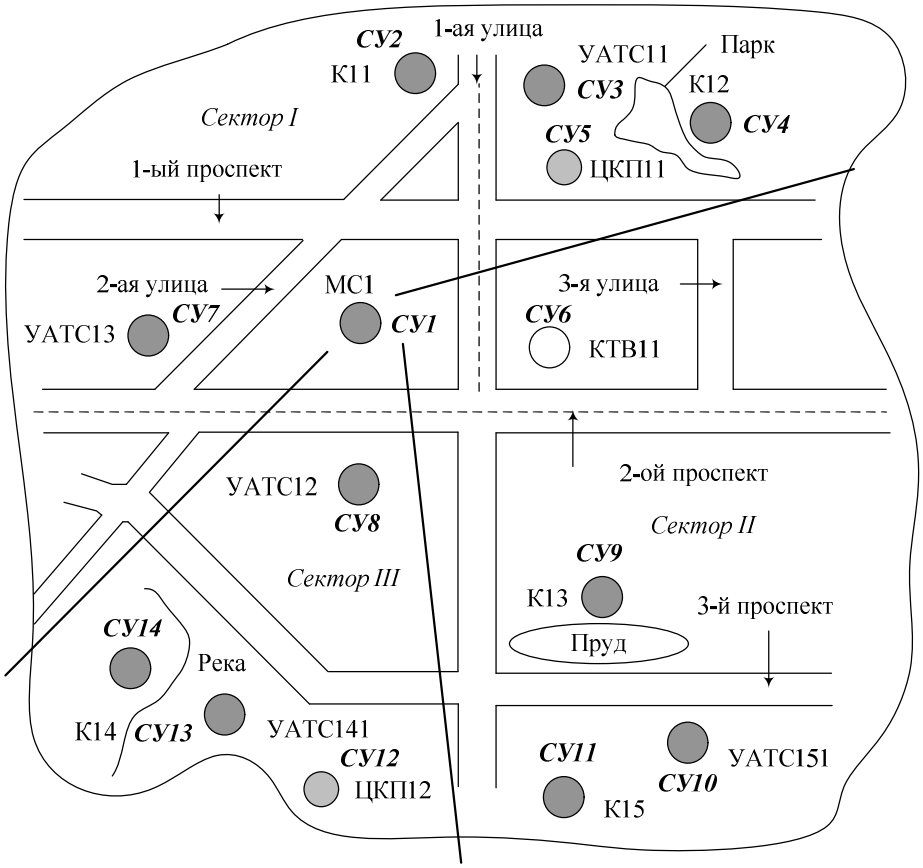


Рисунок 2.24. Модель пристанционного участка, разделяемого на сектора

Для решения практических задач в большинстве случаев можно использовать метод перебора всех возможных вариантов. Это позволит найти действительно оптимальное решение. Для анализа путей решения поставленной задачи целесообразно рассмотреть матрицу $\|C_{ij}\|$:

$$\left\|\begin{matrix}
- & c_{1-2} & c_{1-3} & c_{1-4} & c_{1-5} & c_{1-6} & c_{1-7} & c_{1-8} & c_{1-9} & \infty & \infty & c_{1-12} & \infty & c_{1-14} \\
c_{1-2} & - & \infty & \infty & \infty & \infty & c_{2-7} & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\
c_{1-3} & \infty & - & \infty & c_{3-5} & c_{3-6} & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\
\infty & \infty & c_{1-4} & - & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\
c_{1-5} & \infty & c_{3-5} & \infty & - & c_{56} & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\
c_{1-6} & \infty & c_{3-6} & \infty & c_{56} & - & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\
c_{1-7} & c_{2-7} & \infty & \infty & \infty & \infty & - & c_{7-8} & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\
c_{1-8} & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & c_{7-8} & - & c_{8-9} & \infty & \infty & c_{8-12} & \infty & \infty \\
c_{1-9} & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & c_{8-9} & - & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\
\infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & - & c_{10-11} & \infty & \infty & \infty \\
\infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & c_{10-11} & - & c_{11-12} & c_{11-13} & \infty \\
c_{1-12} & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & c_{8-12} & \infty & \infty & c_{11-12} & - & c_{12-13} & \infty \\
\infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & c_{11-13} & c_{12-13} & - & \infty \\
c_{1-14} & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & -
\end{matrix}\right\|. \quad (2.12)$$

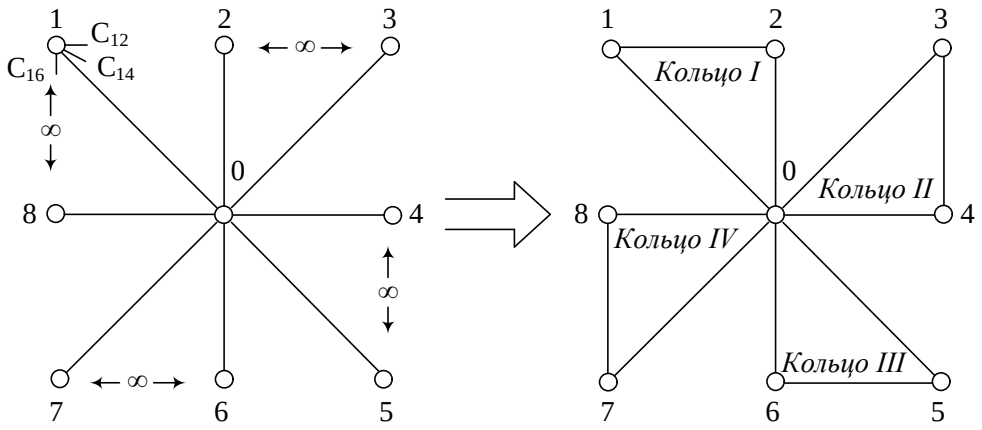
При составлении матрицы (2.12) предполагалось, что $c_{ij} = c_{ji}$. Подобное допущение приемлемо даже при асимметричном трафике между узлами коммутации коммутируемой сети. В главной диагонали рассматриваемой матрицы поставлен символ "$-$". Для некоторых задач главную диагональ матрицы целесообразно формировать из знаков "0" или "∞

". В частности, при $c_{ii} = \infty$ упрощается задача исключения из дальнейшего анализа маршрутов с петлями [45, 46].

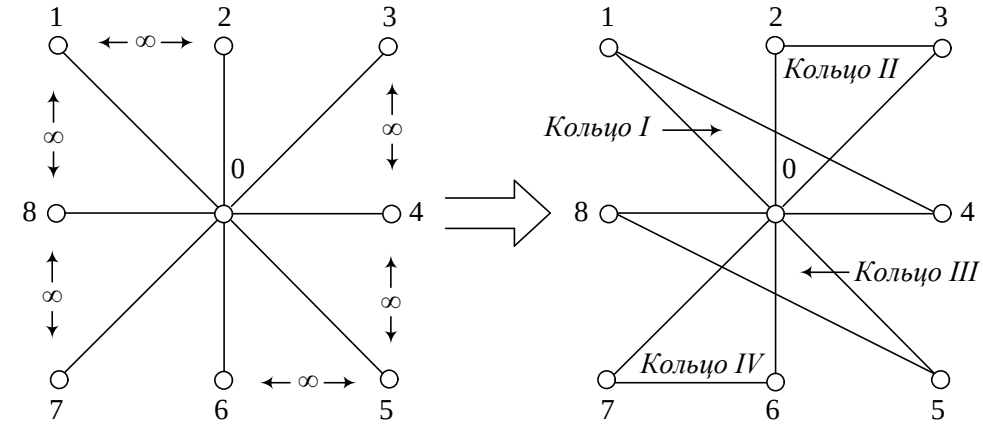
Понятно, что для матрицы (2.12) анализ вариантов построения транспортной сети упрощается. Если все или почти все величины c_{ij} отличны от бесконечности, то решение поставленной задачи перебором возможных вариантов может быть получено только при небольшом числе СУ. Проблему выделения секторов в транспортной сети нельзя свести к классической *задаче коммивояжера* [46]. Следует анализировать модель с несколькими коммивояжерами [47, 48]. Похожая модель разработана для решения задачи, известной в англоязычной технической литературе по названию *"Vehicle Routing Problem"*.

Многие специалисты рассматривают графы, содержащие большое число вершин. Для таких моделей точное определение оптимальной структуры затруднительно [49, 50]. По этой причине значительная часть математических методов разработана для получения решения, близкого к оптимальному [51, 52].

На рисунке 2.25 показаны два варианта образования четырех колец в транспортной сети, состоящей из девяти СУ. Символом "∞" для обоих вариантов – левый фрагмент рассматриваемой модели – отмечен тот факт, что стоимость создании соответствующей линии передачи чрезмерно велика. На практике это означает, что построение линии передачи невозможно.



а) Первый пример образования колец в транспортной сети



б) Второй пример образования колец в транспортной сети

Рисунок 2.25. Модель транспортной сети доступа с девятью СУ

Для варианта (а) СУ под первым номером может быть включен в кольцо за счет одной из трех линий передачи. Эти линии передачи могут соединить первый СУ с узлами под номерами 2, 4 или 6. Для каждого возможного решения несложно определить затраты Оператора: c_{12}, c_{14} и c_{16}. Для варианта (а) показано кольцо I, которое образовано за счет

построения линии передачи между первым и вторым СУ. Такое решение соответствует условиям: $c_{12} < c_{14}$ и $c_{12} < c_{16}$. Аналогичные предположения могут быть сформулированы для СУ3, СУ5 и СУ7.

В нижней части рисунка 2.25 – вариант (б) – показана модель транспортной сети, которая будет оптимальной для других соотношений между величинами c_{ij}. Решения для рассматриваемой модели предопределены теми направлениями линий передачи, которые отмечены символами "∞". Для рассматриваемой модели поиск оптимальной структуры транспортной сети с несколькими кольцами – тривиальная задача. Для типичных пристанционных участков выбор оптимальной структуры транспортной сети доступа обычно представляет более сложный процесс. Деление транспортной сети доступа на сектора может быть выполнено с помощью алгоритма, основанного на известных методах *"северо-западного угла"* или *"запрещенных клеток"*, которые были разработаны для решения *"транспортной задачи"* [53, 54].

Поставленную задачу можно рассматривать как нахождение минимума целевой функции методом прямого поиска [50]. Целевая функция $F(l,h)$ определяет суммарную стоимость линий передачи длиной l и оборудования всех СУ с пропускной способностью h. Для $j-го$ варианта построения транспортной сети требуются линии передачи с суммарной длиной l_j и с пропускной способностью коммутаторов в СУ, равной h_j. План построения транспортной сети должен быть выбран так, чтобы при заранее заданных ограничениях обеспечивались минимальные суммарные затраты на линии передачи – $C(l)$ и оборудование СУ – $C(h)$:

$$F(l,h) = C(l) + C(h) \to min. \qquad (2.13)$$

Целесообразно выделить два вида ограничений, свойственных целевой функции (2.13). Во-первых, число СУ в каждом кольце ограничивается величиной N_{MAX}, выбор которой определяется требованиями к надежности транспортной сети. Во-вторых, пропускную способность коммутатора в СУ следует ограничить величиной h_{MAX}. Такой подход представляется разумным с учетом эксплуатационных характеристик выносных модулей.

Типичный вид функций $C(l)$ и $C(h)$ показан на рисунке 2.26. В качестве функции $C(l)$ показаны две кривые, определяющие затраты на линию передачи протяженностью l и для так называемой строительной длины, когда стоимость кабеля кратна величине l_0.

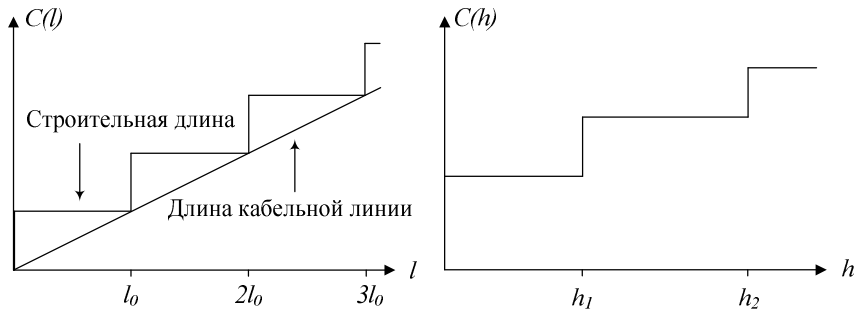


Рисунок 2.26. Типичный вид функций $C(l)$ и $C(h)$

Выбор вида функции $C(l)$ осуществляется на основе технического задания, которое составляет Оператор связи. Целесообразно оперировать функцией следующего вида:

$$C(l) = a_0 + l(b_0 + c_0). \qquad (2.14)$$

В этой формуле величина a_0 определяет ту часть стоимости линии передачи, которая не зависит от длины (например, цена барабана, на который намотан кабель, и затраты

на проектные работы). Коэффициент b_0 позволяет рассчитать стоимость линии передачи в зависимости от ее длины. Затраты на кабельную канализацию определяются после умножения длины кабеля на коэффициент c_0.

На рисунке 2.27 представлен фрагмент транспортной сети, включающий тринадцать СУ. Территория рассматриваемого фрагмента покрыта координатной сеткой. Решаемая задача состоит в выборе оптимальной структуры транспортной сети на базе кольцевых топологий. Сплошными линиями показаны существующие трассы кабельной канализации.

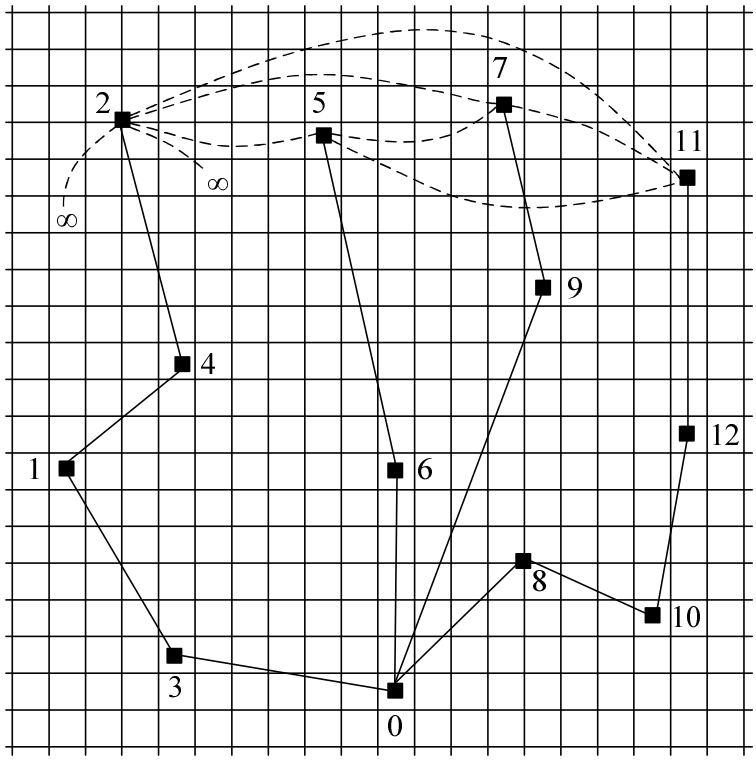
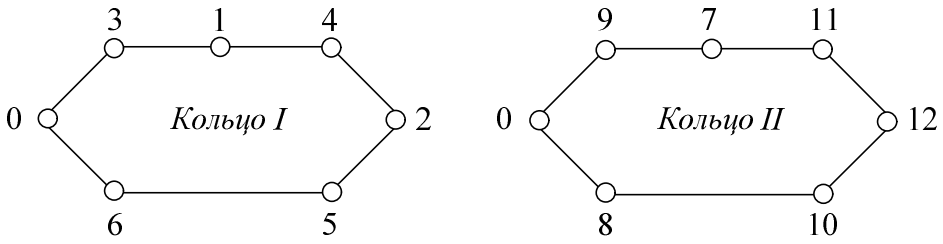


Рисунок 2.27. Фрагмент транспортной сети из 13 узлов

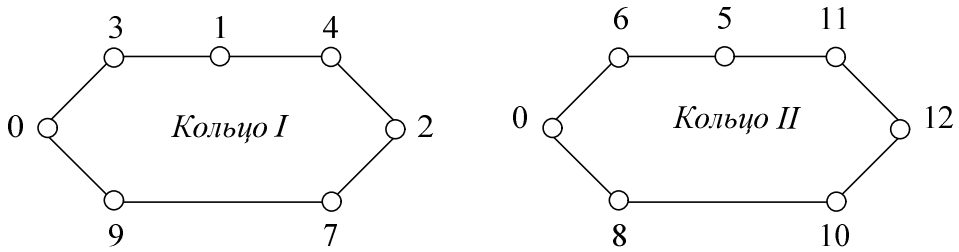
Для этих трасс величины $C(l)$ рассчитываются с минимальной погрешностью. Пунктирные линии показывают те направления кабельной канализации, которые могут быть созданы при выполнении условия $c_0 l < \infty$. Погрешность при оценке величины $C(l)$ в данном случае будет существенно выше. Символ "∞" указывает на то обстоятельство, что строительство кабельной канализации невозможно.

Схожесть предлагаемого алгоритма с методом "северо-западного угла" состоит в том, что поиск возможных вариантов выделения колец начинается с вершины, расположенной в левой верхней части графа. Этой вершине в рассматриваемой модели присвоен второй номер. Она может быть соединена только с пятой, с седьмой или с одиннадцатой вершинами. Определение перечня возможных путей, приводящих к образованию кольца, должно быть сделано для всех вершин, которыми заканчиваются трассы кабельной канализации с точки зрения магистрального участка.

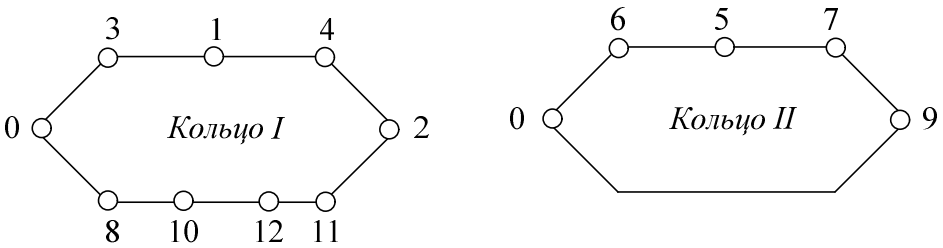
На рисунке 2.28 приведены три варианта выделения двух колец, полученных за счет реализации предлагаемого алгоритма. Фрагмент структуры транспортной сети состоит из двух колец, которые не имеют общих линий передачи. Общим СУ всегда будет нулевой узел, так как в нем должны начинаться и заканчиваться все кольца. Для третьего варианта характерно различие численности СУ в первом и во втором кольцах.



а) Пара колец, выбранных в качестве первого варианта



б) Пара колец, выбранных в качестве второго варианта



в) Пара колец, выбранных в качестве третьего варианта

Рисунок 2.28. Три варианта выделения колец в транспортной сети из 13 узлов

Допустим, что первое кольцо для третьего варианта соответствует требованиям по допустимому количеству включаемых СУ (ограничение численности узлов напрямую связано с требованиями к величине коэффициента готовности). Тогда выбор варианта осуществляется по минимуму необходимых инвестиций для построения транспортной сети, отвечающей заданным характеристикам: пропускной способности, коэффициенту готовности и другим атрибутам.

Обходя по часовой стрелке все трассы кабельной канализации, можно за счет перебора возможных вариантов найти оптимальные решения для транспортной сети в целом. Использование координатной сетки упрощает нахождение тех направлений, для которых стоимость построения линии передачи следует считать бесконечно большой величиной.

Вернемся к структуре сети, показанной на рисунке 2.27. Помимо решений, которые подразумевают выделение двух колец, независимых в смысле надежности [16, 17], возможны также и другие варианты построения транспортной сети. Отсутствие общих элементов в формируемых кольцах не следует считать обязательным требованием. Существенным остается выполнение норм, которые касаются коэффициента готовности и времени восстановления связи при отказах.

Структура транспортной сети, которая допускает наличие общих линий передачи (ребер графа), может быть образована за счет связей СУ2 – СУ5, СУ5 – СУ7 и СУ7 – СУ11. По величине необходимых затрат эта сеть будет превосходить, по крайней мере, первый вариант (рисунок 2.28). Скорее всего, данное решение будет неэкономичным и по сравнению с двумя другими вариантами построения транспортной сети, если учитывать ограничения, свойственные современным требованиям. Если требования к коэффициенту

готовности существенно возрастут, то рассматриваемое решение может оказаться самым эффективным. К нему можно перейти, организовав всего одну новую линию передачи.

На рисунке 2.29 такая возможность показана для первого варианта построения транспортной сети доступа. Линия передачи между СУ5 и СУ7 создается позже. Очевидно, что коэффициент готовности для транспортной сети с такой структурой будет выше за счет возможности создания большего числа путей обмена информацией между СУ0 и любым другим узлом. Примеры расчета коэффициента готовности для сетей со структурой, которая подобна приведенной на рисунке 2.29, можно найти в [55]. Структура рассматриваемой транспортной сети напоминает сотовую топологию. Дальнейшее повышение требований к надежности будет, по всей видимости, стимулировать переход от кольцевых структур к сотовым топологиям.

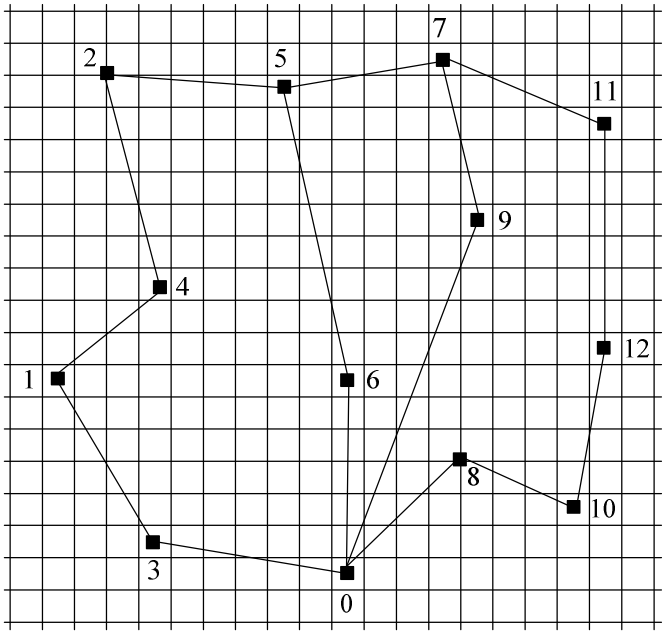


Рисунок 2.29. Транспортная сеть с кольцами, имеющими общие линии передачи

Соображения, изложенные выше, позволяют наглядно представить алгоритм, который может быть использован для выделения секторов в транспортной сети. Этот алгоритм рассчитан на диалог с проектировщиком. Подразумевается, что в некоторых случаях потребуется принятие решений. Это означает, что на данном этапе планирования сети проектировщик выполняет функции ЛПР. Следует еще раз подчеркнуть, что процесс планирования транспортной сети тесно связан с общими задачами модернизации всей инфокоммуникационной системы. С этой точки зрения процесс выделения секторов следует рассматривать как неотъемлемую часть процесса планирования эксплуатируемых телекоммуникационных сетей.

Предлагаемый алгоритм показан на рисунке 2.30. Четыре этапа основной ветви рассматриваемого алгоритма не нуждаются в каких-либо комментариях. Целесообразно прокомментировать ряд соображений, начинающихся с блока "Решение получено?", который изображен в виде ромба. Положительный ответ на этот вопрос означает, что выделение секторов осуществлено успешно с учетом критериев выбора оптимального варианта и заранее сформулированных ограничений. Отрицательный ответ следует трактовать следующим образом: структура транспортной сети доступа, для которой затраты Оператора минимальны, найдена, но требования к надежности выполняются не для всех СУ. Дело в том, что один (или более) СУ в некоторых сетях доступа нельзя включить ни в одно из создаваемых колец, так как строительство новой кабельной канализации не представляется реальным. Такая ситуация, тем не менее, не влияет на возможность поиска структуры транспортной сети доступа с минимальной стоимостью.

Рисунок 2.30. Алгоритм выделения секторов в транспортной сети

В подобных ситуациях проектировщик после анализа причин получения ответа "Нет" может ввести коррекции, которые удобно разделить на три группы. Во-первых, можно пересмотреть матрицу стоимости. Такое решение, с практической точки зрения, означает новый поиск направления связи для конкретного СУ. Если такое направление найдено, то один из символов "∞" в матрице вида (2.12) заменяется конечной величиной c_{ij}. Это позволит корректно решить поставленную задачу.

Во-вторых, может быть пересмотрен ряд ограничений. Например, для некоторой части СУ устанавливаются менее жесткие нормы на величину коэффициента готовности. Тогда обеспечение требований SLA для конкретных пользователей может достигаться резервированием линий передачи средствами доступа, использующими беспроводные технологии [38, 56, 57].

В-третьих, можно пересмотреть часть исходных данных. Например, изменяются некоторые границы пристанционного участка, устанавливаемые при выборе оптимальной структуры базовой сети. В подобных случаях ряд выносных модулей (концентраторов и УАТС) может быть включен в соседнюю коммутационную станцию.

Выбор вида коррекции часто осуществляется на основании опыта проектировщика. Другой подход заключается в усложнении алгоритма за счет автоматизации трех вариантов коррекции, рассмотренных выше. К вопросам такого рода следует вернуться после анализа опыта, который будет накоплен в процессе проектирования перспективных транспортных сетей.

2.3.6. Выбор кольца для включения СУ

Для транспортной сети, построенной в виде двух концентрических окружностей, задачи проектирования формулируются в ином виде. На рисунке 2.31 изображена модель фрагмента такой сети. Она состоит из десяти СУ. Для СУ0, находящегося в одном помещении с коммутационной станцией, задача выбора места подключения не актуальна. Для шести СУ (с номерами 1, 2, 5, 7, 8 и 9) выбор кольца, в которое целесообразно включиться, очевиден. Необходимо сделать такой выбор для трех других СУ. Стоимость линии передачи обычно определяется ее длиной до точки включения в кольцо. Если, например, $l_{31} \approx l_{32}$, то СУ3 можно включить в любое из двух колец. Очевидно, что для СУ4 справедливо неравенство $l_{41} > l_{42}$. Это означает, что данный узел следует включить в состав второго кольца.

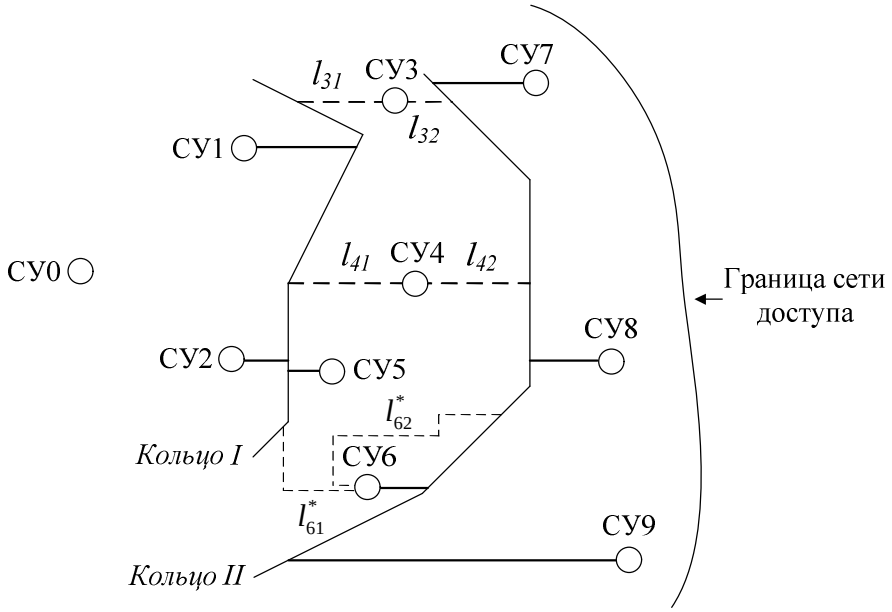


Рисунок 2.31. Модель фрагмента транспортной сети с двумя кольцами

Ситуация с СУ6 иллюстрирует возможность принятия ошибочного решения, если руководствоваться картой или планом пристанционного участка без учета реальных длин линий передачи. Они обозначены как l^*_{61} и l^*_{62}. Судя по плану пристанционного участка СУ6 целесообразно включить в кольцо II. На самом деле справедливо следующее неравенство: $l^*_{62} > l^*_{61}$. Поэтому СУ6 следует подключить к первому кольцу.

Строго говоря, длина линии передачи не всегда позволяют оценить ее стоимость. В некоторых случаях, которые касаются прокладки кабельной канализации в исторической части города или в сложных геологических условиях, может оказаться разумным выбрать более "длинный" путь. Если стоимостные оценки линий передачи известны, то лучше оперировать ими вместо величин l_{ij}.

Очевидно, что решение поставленной задачи можно считать тривиальным. Простота планирования при прочих равных условиях может считаться весьма весомым аргументом при выборе схемы построения транспортной сети. Правда, реализация сети с двумя концентрическими окружностями требует решения еще одной задачи. Речь идет о выборе трасс прокладки обоих колец. На рисунке 2.32 показана структура сети с указанием мест расположения пятнадцати СУ. Суммарная длина линий передачи складывается из трех основных компонентов. Первые два компонента – длины линий передачи обоих колец, включая направления их связи с СУ0 (центром сети доступа). Третий компонент – сумма длин линий передачи между всеми узлами (за исключением СУ0) и тем кольцом, к которому они будут подключены, – l_j.

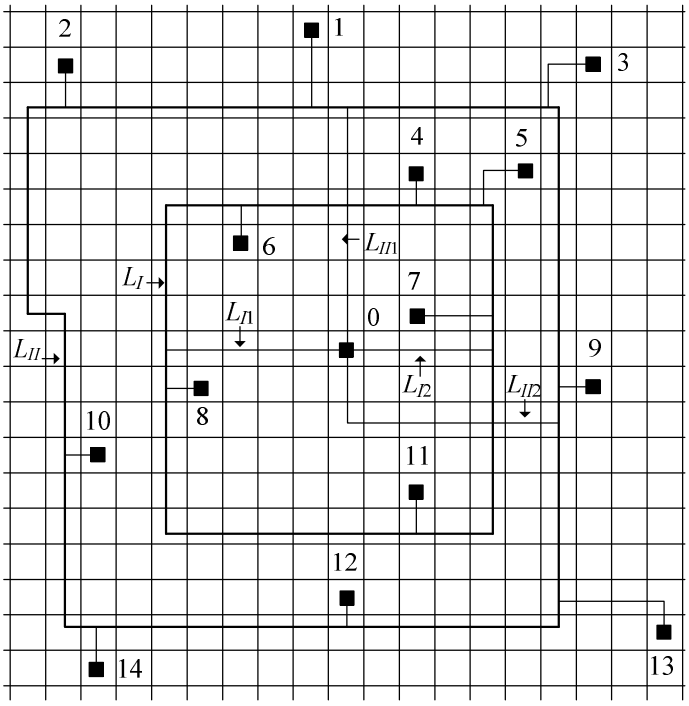


Рисунок 2.32. Структура транспортной сети с двумя кольцами

Суммарная длина линий передачи (L_S) для транспортной сети, в которой, помимо СУ0, насчитывается N узлов, рассчитывается по такой формуле:

$$L_S = L_I + L_{II} + L_{I1} + L_{I2} + L_{II1} + L_{II2} + \sum_{j=1}^{N} l_j. \qquad (2.15)$$

Выражение (2.15) позволяет перейти от расчета суммарной длины линий передачи к оценке капитальных затрат на создание транспортной сети в целом – K_S. Условие выбора оптимальной структуры транспортной сети определяется формулой (2.13). Поставленная задача, как правило, может быть решена перебором всех возможных вариантов. Для уменьшения объема вычислений целесообразно определить наиболее вероятную область изменения радиуса внешнего и внутреннего колец. Для этого можно воспользоваться моделью транспортной сети, которая приведена на рисунке 2.33. Предполагается, что форма пристанционного участка похожа на круг с радиусом Z_3.

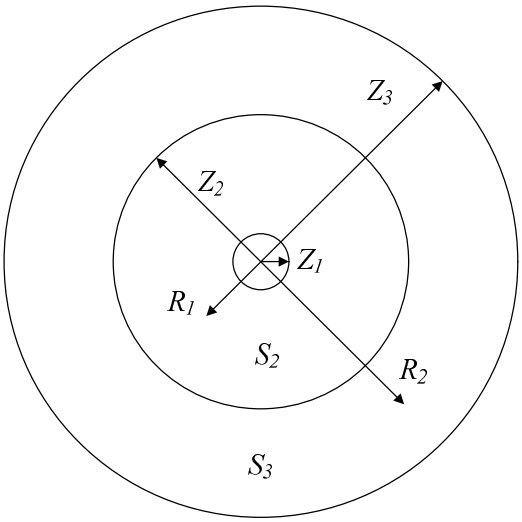


Рисунок 2.33. Оценка радиусов концентрических окружностей

Обычно коммутационная станция окружена зоной прямого питания, радиус которой – Z_1 для АТС электромеханического типа, как правило, находится в диапазоне от 300 до 500 метров. Величины площадей двух колец (S_2 и S_3), которые показаны на рисунке 2.33, определяются очевидными соотношениями:

$$S_2 = \pi\left(Z_2^2 - Z_1^2\right), \quad S_3 = \pi\left(Z_3^2 - Z_2^2\right). \tag{2.16}$$

Технико-экономические оценки, которые приведены в [58, 59], показывают, что в перспективных сетях доступа радиус ЗПП существенно сокращается. Для приближенного анализа модели, которая рассматривается в этом параграфе, можно предположить, что $Z_1 = 0$. В таком случае, равенство $S_2 = S_3$ эквивалентно условию одинаковой численности выносных модулей в обоих кольцах. Величина Z_2 оценивается по такой формуле:

$$Z_2 = \frac{Z_3}{\sqrt{2}}. \tag{2.17}$$

Предполагая, что все выносные модули распределены по площади пристанционного участка равномерно, несложно определить величины радиусов обоих колец: R_1 и R_2. Очевидно, что они должны проходить на одинаковом удалении от границ, которые определяются значениями Z_2 и Z_3:

$$R_1 = \frac{Z_3}{2\sqrt{2}} \approx 0,3536Z_3, \quad R_2 = \frac{Z_3(1+\sqrt{2})}{2\sqrt{2}} \approx 0,8536Z_3. \tag{2.18}$$

Из приведенных выше формул для величин радиусов обоих колец следует очевидное соотношение: $R_2 - R_1 = 0,5Z_3$. Эти оценки позволяют упростить ряд вычислительных процедур при реализации алгоритма выбора оптимальных трасс для обоих колец.

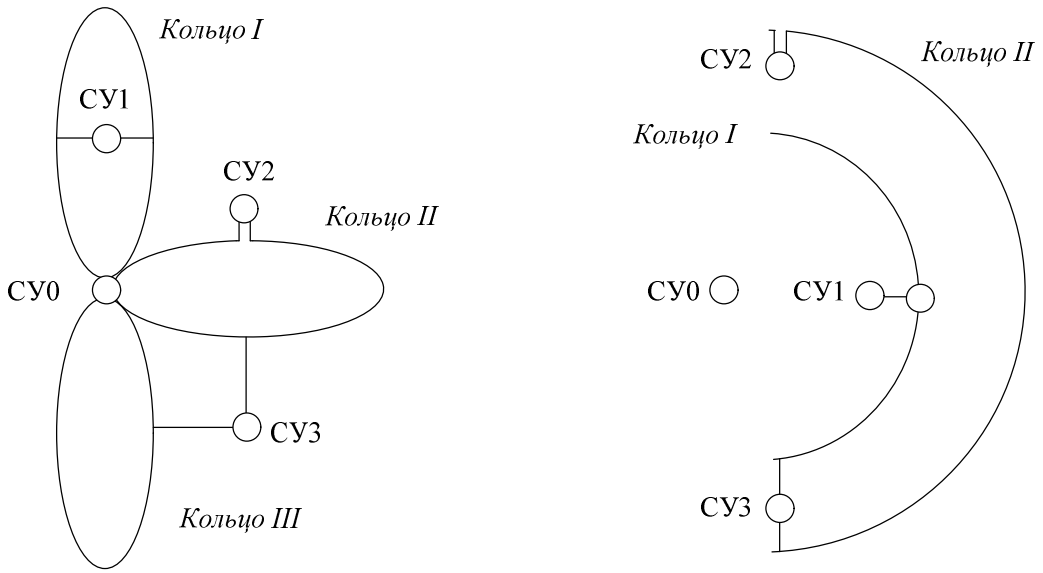
Алгоритмы для поиска трасс, по которым целесообразно проложить оба кольца, и для определения места подключения каждого СУ в транспортную сеть доступа могут быть представлены последовательностью процессов, приведенной на рисунке 2.30. Сходство алгоритмов следует считать формальным, ибо соответствующие программные продукты будут различаться весьма существенно.

2.3.7. Включение новых СУ

Особенность транспортной сети, относящейся к классу *консервативных сложных технических систем* [60], заключается в длительном "жизненном цикле" [61]. Выбор структуры транспортной сети осуществляется на основе той информации обо всех СУ, которая доступна к началу работ по планированию развития инфокоммуникационной системы. После реализации проектных решений будут появляться новые СУ, которые – в силу объективных и субъективных причин – не вошли в перечень прогнозируемых объектов. Можно сформулировать также и другую задачу: СУ становится ненужным. Например, ликвидируется промышленное предприятие, а на его месте будет разбит парк.

Естественно, что появление нового СУ с высокой вероятностью приведет к тому, что транспортная сеть перестанет быть оптимальной. Такое явление – неизбежное следствие ошибок прогнозирования. Задача проектировщика заключается в минимизации затрат на включение новых СУ. На рисунке 2.34 показаны два фрагмента транспортной сети, которые реализованы на основе разных топологий. Для обоих фрагментов решается одна задача – выбор способа включения трех новых СУ. Первый фрагмент иллюстрирует вариант построения транспортной сети, основанный на выделении нескольких секторов. Первый из вновь подключаемых СУ делит кольцо I на две части. Второй СУ включается в кольцо II, которое "разрезается" в заранее выбранном месте. Для включения третьего СУ исполь-

зуются линии передачи между кольцами II и III. Способ, выбранный для СУ1, эффективен в том случае, если затраты Оператора можно считать приемлемыми.



а) Первый фрагмент транспортной сети б) Второй фрагмент транспортной сети

Рисунок 2.34. Включение трех новых СУ в транспортную сеть

Несомненным достоинством рассматриваемого решения следует считать повышение надежности кольца I. Это объясняется созданием мостиковой схемы, которая отличается высоким коэффициентом готовности [16, 17].

Затраты на включение СУ2 будут, как правило, минимальны по сравнению с другими решениями. Такой вывод справедлив при условии, что обе линии передачи, которые обеспечивают подключение СУ2, проходят по одной трассе. В результате, надежность такой схемы будет минимальна из-за недостатков, свойственных "плоскому кольцу".

Решение, предлагаемое для третьего СУ, предусматривает связь с двумя кольцами. Оно может быть реализовано в том случае, если величина необходимых инвестиций приемлема для Оператора. Наличие линии передачи между кольцами II и III позволяет существенно повысить надежность транспортной сети. Фактически подобный сценарий ведет к постепенному формированию сотовой топологии.

Задача выбора оптимального решения для включения новых СУ может быть решена перебором возможных вариантов. Важная задача проектировщика состоит в том, чтобы предложить ЛПР не только самый экономичный способ включения новых СУ, но и показать возможность существенного роста надежности транспортной сети при некотором увеличении стоимости проекта.

В правой части рисунка 2.34 показаны три разных способа включения новых СУ в транспортную сеть, состоящую из двух концентрических окружностей. Для первого, второго и третьего узлов предлагаемые решения похожи на те варианты, которые были рассмотрены соответственно для СУ1, СУ2 и СУ3 в процессе анализа предыдущего фрагмента транспортной сети. Различие состоит в способе присоединения СУ1 к кольцу I. Для второго фрагмента транспортной сети показано включение СУ1 в ранее созданный узел. Это самое экономичное решение, но надежность подключения СУ в транспортную сеть доступа будет минимальной. Тем не менее, в ряде ситуаций приходится выбирать именно такое решение. Важно предусмотреть в перспективе подключение таких СУ при помощи еще одной линии передачи к кольцу I или II для обеспечения всех заданных требований к надежности транспортной сети.

2.3.8. Оценка ресурсов для резервирования сети доступа

В настоящее время задача резервирования транспортных ресурсов не решена только для сети доступа – самого ненадежного фрагмента инфокоммуникационной системы [9]. Известно, что отказы в сети доступа чаще всего становятся причиной отсутствия связи [22]. Создание сетей мобильной связи можно (это было отмечено выше) рассматривать как реализацию системы, обеспечивающей надежный доступ для услуг телефонной связи. Фактически образуется еще один независимый путь обмена информацией между оборудованием в помещении пользователя и базовой сетью – элементами той модели инфокоммуникационной системы, которая была показана на рисунке 1.32 в первой главе монографии.

Остается нерешенной задача резервирования ресурсов, которые необходимы для высокоскоростного обмена данными. Подобные проблемы очень актуальны для тех групп пользователей, чьи бизнес-процессы подразумевают непрерывный обмен данными, Кроме того, резервирования ресурсов становится очень серьезной проблемой для поддержки услуг, предусматривающих получение видеоинформации. В частности, при получении программ телевещания посредством ССП следует учитывать требования по устойчивой работе средств массовой информации.

Эффективный способ обеспечения резервирования транспортных ресурсов был предложен в [38, 62]. Он основан на совместном использовании двух видов технологий доступа – проводного и беспроводного. Первый вид технологий доступа подразумевает использование имеющейся среды передачи сигналов. На рисунке 2.35 примерами средств, используемых для проводного доступа, служат оптическое волокно или двухпроводная физическая цепь. В качестве второй технологии выбран стандарт WiMAX [56], но возможны и другие решения.

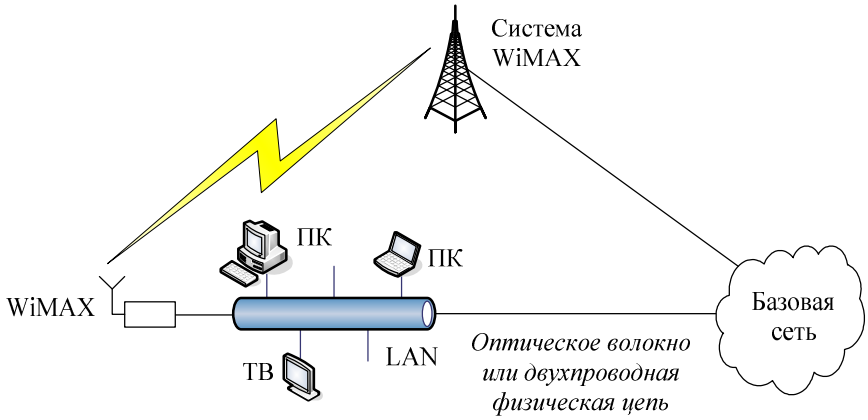


Рисунок 2.35. Резервирование транспортных ресурсов в сети доступа

Если проводная линия исправна, то аппаратные средства WiMAX, которые входят в состав оборудования локальной сети, не задействуются. В случае отказа (например, при обрыве кабеля) обмен данными (а при необходимости – и видеоинформацией) будет осуществляться через тракт WiMAX. Если в локальную сеть включается и IP-УАТС, то все виды трафика (речь, данные и видео) могут быть обслужены за счет транспортных ресурсов системы беспроводного доступа.

Рассматриваемому способу резервирования транспортных ресурсов – в дополнение к созданию независимых путей обмена информацией – присущи и другие полезные особенности. Одна из них заключается в том, что ресурсы системы беспроводного доступа могут предоставляться множеству пользователей. Это утверждение иллюстрирует рисунок 2.36. На нем показан пример применения оборудования беспроводного доступа, которое использует технологию WiMAX. Предполагается, что в соответствии с соглашениями SLA необходимо обеспечить высокую вероятность доступа для семи пользователей, которые расположены на территории трех магистральных участков (первого, второго и третьего).

Предполагается, что соответствующие территории находятся в секторах "А" и "В", обслуживаемых системой WiMAX.

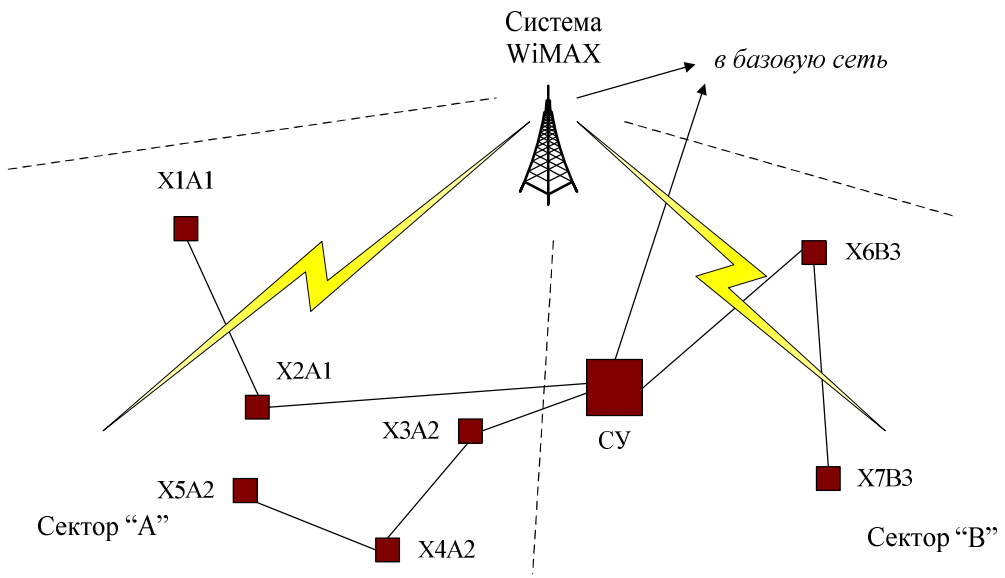


Рисунок 2.36. Пример резервирования транспортных ресурсов трех магистральных участков за счет использования оборудования WiMAX

Каждому пользователю, имеющему резервный доступ, присвоен номер из трех символов, следующих за буквой " X ". Первая цифра определяет номер пользователя. Второй символ (буква) идентифицирует сектор обслуживания в системе беспроводного доступа. Последняя цифра соответствует номеру магистрального участка, через который организуется доступ для данного пользователя.

Из N_0 абонентов, обслуживаемых одной сетью доступа, только некоторая их часть – N_1 будет заключать с Оператором соглашение SLA. Очевидно, что $N_1 \ll N_0$. Для каждого $i-го$ клиента, заключившего с Оператором соглашение SLA $\left(i=\overline{1,\ N_1}\right)$, оговариваются необходимые резервные транспортные ресурсы – B_i. В любой сети доступа можно выделить N_2 магистральных участков. Несомненно, что справедливо следующее неравенство: $N_2 < N_1$. Величина R_j определяет резервную пропускную способность, которая необходима пользователям, расположенным на территории $j-го$ магистрального участка $\left(j=\overline{1,\ N_2}\right)$. Введем функцию $\delta(i,j)$, равную единице, когда $i-й$ пользователь расположен в границах $j-го$ магистрального участка. В противном случае $\delta(i,j)=0$. Тогда величины R_j рассчитываются следующим образом:

$$R_j = \sum_{i=1}^{N_1} \delta(i,j) B_i. \qquad (2.19)$$

Границы магистральных участков сети доступа и секторов обслуживания системы беспроводного доступа, число которых равно N_3, как правило, не совпадают. Следует отметить, что с практической точки зрения справедливо неравенство: $N_2 > N_3$. Это означает, что в границах каждого сектора "размещается" несколько магистральных участков. Их следует ранжировать для всех k секторов $\left(k=\overline{1,\ N_3}\right)$, выделив по два магистральных участка, требующих максимальных транспортных ресурсов – $R_1(k)$ и $R_2(k)$. Время восстановления магистрального кабеля весьма существенно. Поэтому нельзя игнорировать

ситуации, когда оборудование беспроводного доступа будет обслуживать абонентов, которые включены в два магистральных кабеля. Вероятностью отказа трех и более магистральных участков можно пренебречь. Пропускная способность для $k-го$ сектора – $R(k)$ вычисляется по такой формуле:

$$R(k) = R_1(k) + R_2(k). \qquad (2.20)$$

Изложенный метод расчета пропускной способности $R(k)$ отражает самые общие принципы оценки резервных транспортных ресурсов. Они, при необходимости, могут быть детализированы.

Математика – единственный совершенный метод,
позволяющий провести самого себя за нос.
(Альберт Эйнштейн)

2.4. Методы расчета транспортной сети

2.4.1. Перечень основных задач

Методы расчета транспортной сети, изложенные ниже, следует рассматривать как набор инструментов для решения тех задач, которые были перечислены в предыдущих разделах данной главы. Способы решения некоторых задач были изложены после их постановки. Цель этого раздела – увязать методы расчета транспортных сетей с процессом планирования инфокоммуникационной системы в целом. Кроме того, в предыдущем разделе многие примеры были связаны с модернизацией сети доступа. Выбор данного фрагмента транспортной сети обусловлен тем, что именно для него приходится решать наиболее сложные задачи. Необходимо изложить ряд соображений, касающихся расчета транспортных сетей более высоких уровней иерархии.

Для любого проекта определяется перечень вопросов, на которые необходимо либо получить ответ, либо сформулировать проблемы, требующие дополнительного изучения. Причем цели в тексте ТЗ обычно формулируются четко, и Заказчик проекта рассчитывает на разработку конкретных рекомендаций. Возникновение новых проблем нельзя считать исключением из правил для особо сложных проектов, к которым относятся решения, подразумевающие создание ССП. Новые проблемы возникают во всех случаях, когда инфокоммуникационная система вступает в фазу радиальной модернизации. В истории развития электросвязи можно найти множество примеров, связанных с появлением новых сложных проблем [21, 37]. Аналогичные примеры известны для больших и сложных систем иного назначения [2].

Следовательно, будет очень полезен опыт разработки проектных решений, которые доказали свою эффективность. Обобщение такого опыта – не такая простая задача, как может показаться на первый взгляд. Во-первых, необходима четко налаженная связь между Проектировщиком и Оператором связи. Во-вторых, должна быть разработана и согласована методика оценки проектных решений с учетом влияния внешних факторов, проявляющихся после введения транспортной сети или ее фрагмента в коммерческую эксплуатацию. В-третьих, возникают вопросы, относящиеся к авторскому праву.

На рисунке 2.37 приведен перечень основных результатов, которые должны быть получены при разработке проекта. Он определяет основные задачи, которые следует решить в процессе планирования транспортной сети. Перечень составлен на основании информации, содержащейся в иллюстрациях 1.3, 1.8, 1.9, 1.10 и 1.11 из первой главы монографии. Темный квадратик в правой верхней части некоторых блоков указывает на то, что при решении соответствующих задач должны также учитываться требования, определяемые развитием коммутируемых сетей. Решению задач модернизации этих сетей посвящена третья глава монографии.

Рисунок 2.37. Основные результаты планирования транспортной сети

Из блока "Поддерживаемые виды обслуживания" выходят пунктирные линии со стрелками. Они подчеркивают то обстоятельство, что перечень предоставляемых услуг в значительной мере определяет как показатели качества обслуживания трафика, так и пропускную способность транспортной сети.

Принципы модернизация транспортной сети определяются направлениями развития инфокоммуникационной системы, выбранными Оператором. По этой причине изложение методов расчета сопровождается комментариями, которые уточняют область применения ожидаемых результатов. Не все поставленные задачи могут быть сформулированы в такой форме, когда они могут быть решены известными экономико-математическими методами. В тех случаях, когда апробированные методы не обеспечивают требуемой точности результатов, внимание читателей акцентируются на соответствующих проблемах. Такой подход принят многими международными организациями: излагается постановка задачи и указывается, что ее решение требует дополнительных исследований. В частности, в ряде рекомендаций МСЭ для этой цели используется стандартная формулировка: *"For further study"* – для дальнейшего изучения.

Названия следующих девяти параграфов совпадают с формулировками результатов, которые приведены в прямоугольниках на рисунке 2.37. Речь идет о тех блоках, которые пронумерованы римскими цифрами.

2.4.2. Основные проблемы эксплуатируемой сети

В современных экономических исследованиях часто используется метод, который известен как SWOT-анализ [63, 64]. Его название образовано из первых букв следующих четырех слов: Strengths (*сильные стороны*), Weaknesses (*слабые стороны*), Opportunities (*возможности*) и Threats (*угрозы*). Этот метод целесообразно использовать и для анализа

основных проблем, свойственных эксплуатируемым транспортным сетям. Экономисты, используя SWOT-анализ, как правило, соотносят сильные и слабые стороны исследуемого объекта или процесса с внутренними факторами. Иногда их называют эндогенными. Возможности и угрозы рассматриваются как внешние (экзогенные) факторы.

Следует отметить, что SWOT-анализ сначала использовался не в экономике. Он применялся для упорядочения (структурирования) информации о текущей ситуации и вероятных тенденциях развития сложных систем. В этом параграфе предпринята попытка вернуться к первоначальному назначению SWOT-анализа как эффективного инструмента исследования проблем, свойственных эксплуатируемым транспортным сетям.

В таблице 2.3 приведены примеры типичных атрибутов, относящиеся к внешним и к внутренним факторам, которые существенны для транспортной сети. Для конкретного проекта перечень рассматриваемых атрибутов может сокращаться или дополняться.

Таблица 2.3. Пример результатов SWOT-анализа

Факторы SWOT	Примеры основных атрибутов транспортной сети
Сильные стороны	Опыт, персонал, инфраструктура, комплекс технических средств
Слабые стороны	Соответствие перспективным требованиям, себестоимость услуг
Возможности	Эффективная модернизация, повышение качества обслуживания
Угрозы	Надежность связи, снижение конкурентоспособности Оператора

Все атрибуты транспортной сети, которые перечислены в таблице 2.3, могут быть проанализированы на качественном уровне – без использования математических методов. Более того, для исследования ряда упомянутых атрибутов не существует общепринятых и апробированных экономико-математических методов. Одна из задач данного параграфа состоит в разработке предложений по применению ряда формализованных методов для объективизации оценок некоторых атрибутов транспортной сети.

Многие характеристики транспортной системы (срок службы линейно-кабельных сооружений и оборудования передачи, длительность восстановления отказов, затраты на обслуживание одного канало-километра и другие) могут рассматриваться как случайные величины. Они обычно оцениваются с неким периодом – τ . Численные значения τ определяются природой анализируемого процесса и измеряются секундами, минутами, часами, днями, кварталами или годами. Независимо от выбранного масштаба по оси "Время" распределение исследуемой случайной величины представимо ступенчатой функцией – $F(t)$. Ее удобно записать в виде преобразования Лапласа-Стилтьеса – $\varphi(s)$:

$$\varphi(s) = e^{-\omega s} \sum_{j=0}^{N} P_j e^{-j\tau s}. \qquad (2.21)$$

Величина ω позволяет "привязать" результаты измерений к календарному году или к иной точке отсчета времени. Таким образом, введение сомножителя $e^{-\omega s}$ позволяет учесть величину постоянного смещения функции $F(t)$ по оси "Время". Значение P_j определяет приращение функции $F(t)$ в точке $j\tau$.

Обычно, без ущерба для результатов анализа, полагают, что $\omega = 0$. Тогда функция $\varphi(s)$ представима в такой редакции:

$$\varphi(s) = \sum_{j=0}^{N} P_j e^{-j\tau s}. \qquad (2.22)$$

Математическое ожидание исследуемой случайной величины – $X^{(1)}$, ее дисперсия – σ_X^2 и коэффициент вариации – C_X определяются следующими соотношениями:

$$X^{(1)} = \tau \sum_{j=0}^{N} jP_j, \quad \sigma_X^2 = \tau^2 \left[\sum_{j=0}^{N} j^2 P_j - \left(\sum_{j=0}^{N} jP_j \right)^2 \right], \quad C_X = \frac{\sqrt{\sum_{j=0}^{N} j^2 P_j - \left(\sum_{j=0}^{N} jP_j \right)^2}}{\sum_{j=0}^{N} jP_j}. \qquad (2.23)$$

Важной характеристикой случайной величины с учетом задач, рассматриваемых в этом параграфе, следует также считать размах распределения [65]. В конце 2006 года мне довелось участвовать в обработке статистических данных по развитию сельской связи. Для одного из сельских муниципальных (административных) районов были получены следующие данные:

- средний "возраст" оборудования и линейных сооружений транспортной сети равен 27 годам;
- дисперсия и коэффициент вариации этой величины составили примерно 38,6 и 0,23 соответственно;
- размах исследуемого распределения (период создания линейных сооружений и установки систем передачи) определяется двумя датами – 1971 и 1989 год.

Полученные оценки позволяют сделать ряд важных выводов, влияющих на выбор пути развития транспортных ресурсов. Во-первых, рассматриваемая транспортная сеть эксплуатируется – в целом – в течение длительного периода времени, что актуализирует работы по ее модернизации. Во-вторых, средней оценке присущ невысокий коэффициент вариации. Это означает, что проблемы из-за физического старения технических средств будут, скорее всего, возникать в большинстве фрагментов сети почти в одно и то же время. В-третьих, размах распределения свидетельствует, что исследуемую транспортную сеть строили восемнадцать лет; в течение последующих семнадцати лет работы по ее модернизации не проводились.

Эти выводы формируют базу для дальнейших рассуждений. Если Оператору ТФОП доступны сведения об удачной модернизации аналогичных транспортных сетей (со схожими статистическими оценками), то решение поставленных задач, как правило, упрощается. Соответствующие аспекты анализа характеристик транспортных ресурсов обсуждаются в параграфе 2.4.4.

Иногда приходится анализировать характеристики суммы случайных величин. Такая задача возникает, например, при исследовании стоимостных показателей транспортной сети. Предположим, что исследуемая зависимость представлена случайными величинами с равномерным законом распределения на отрезках $[0, x]$ и $[0, y]$. Если начальная точка этих интервалов находится не в нуле, то можно ввести постоянное смещение, которое легко учесть при переходе к изображениям соответствующих функций распределений. Для получения функции распределения исследуемой случайной величины целесообразно воспользоваться правилом свертки изображений [66]. Для обеих функций распределения – $F_1(x)$ и $F_2(y)$ преобразования Лапласа-Стилтьеса вычисляются следующим образом:

$$\varphi_1(s) = \frac{1 - e^{-xs}}{xs}, \quad \varphi_2(s) = \frac{1 - e^{-ys}}{ys}. \qquad (2.24)$$

Тогда преобразование Лапласа-Стилтьеса функции распределения величины z, равной $x + y$, представимо в такой форме:

$$\varphi(s) = \frac{1 - e^{-ys} - e^{-xs} + e^{-(x+y)s}}{xys^2}. \qquad (2.25)$$

Оригинал распределения – функция $F(z)$ определяется на основании первой теоремы смещения [66]:

$$F(z)=\frac{1}{2xy}\begin{cases} z^2, \quad при\ 0\le z<x \\ x(2z-x), \quad при\ x\le z<y \\ 2z(x+y)-(z^2+x^2+y^2), \quad при\ y\le z<x+y \\ 2xy, \quad при\ z\ge x+y \end{cases}. \tag{2.26}$$

Формула (2.26) справедлива для так называемого треугольного распределения случайной величины [67]. С другой стороны, распределения $F_1(x)$ и $F_2(y)$ получаются в результате аппроксимации ступенчатых функций. Данные функции удобно представить при помощи соответствующих преобразований Лапласа-Стилтьеса – $\gamma_1(s)$ и $\gamma_2(s)$:

$$\gamma_1(s)=\sum_{i=0}^{k}Q_i e^{-is}, \quad \gamma_2(s)=\sum_{j=0}^{m}R_j e^{-js}. \tag{2.27}$$

Приращения Q_i и R_j определяют вероятность изменения исследуемых функций в точках i и j соответственно. Преобразование Лапласа-Стилтьеса функции распределения величины z определяется по правилу перемножения степенных рядов [68]. Это означает, что функция $\gamma(s)$ будет ступенчатой:

$$\gamma(s)=\sum_{j=0}^{km}\left(\sum_{i=0}^{j}Q_i R_{j-i}\right)e^{-js}. \tag{2.28}$$

На рисунке 2.38 приведены распределения $F(z)$ и $G(z)$. Они построены для данных, определяющих капитальные затраты на создание транспортной сети. Статистика была получена для цифровых систем передачи (ЦСП) и линейных сооружений на основании анализа нескольких проектов. Нулевая точка на оси абсцисс соответствует минимальным суммарным затратам для обоих компонентов транспортной сети. Поведение функций $F(z)$ и $G(z)$ свидетельствует, что в некоторых точках по оси абсцисс существуют заметные расхождения между значениями исследуемой величины. Поэтому для получения оценок, которые необходимы при планировании сети, лучше использовать выражение (2.28).

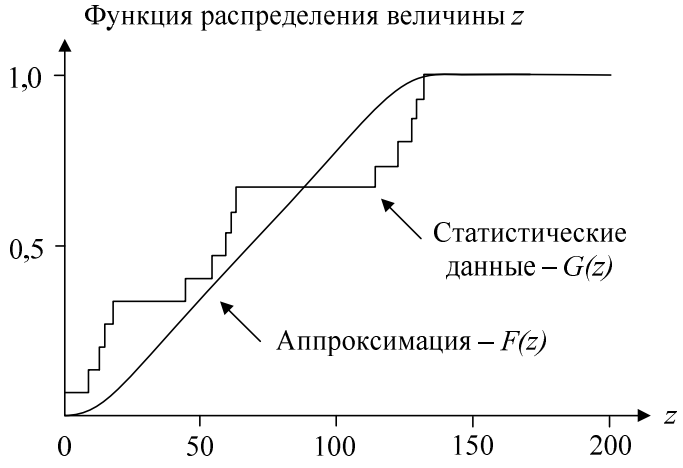


Рисунок 2.38. Распределение суммы двух случайных величин

Различие между ступенчатой функции и непрерывной аппроксимирующей кривой может привести и к ошибкам другого рода. На рисунке 2.39 приведен пример, который иллюстрирует зависимость стоимости двух компонентов инфокоммуникационной системы – $F_1(N)$ и $F_2(N)$ от количества обслуживаемых терминалов – N. Функция $F(N)$ определяет общую стоимость системы. Она определяется суммой $F_1(N)+F_2(N)$.

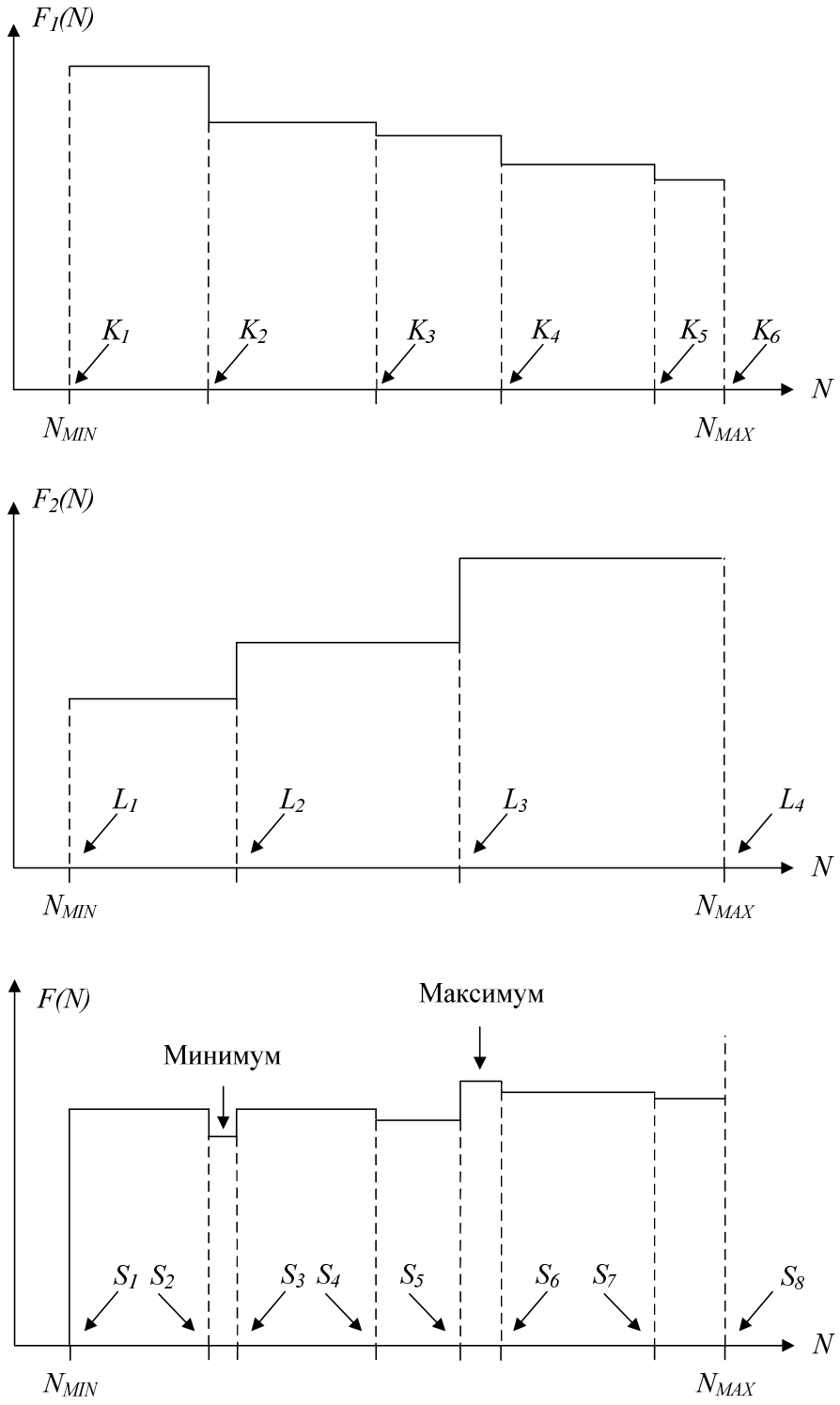


Рисунок 2.39. Экстремумы суммы двух ступенчатых функций

Точки K_i соответствуют моментам возможных изменений функции $F_1(N)$. Все приращения функции $F_2(N)$ происходят в моменты времени L_j. Совокупность точек K_i и L_j образуют множество $\{S\}$, которое определяет моменты изменений функции $F(N)$. Эта функция имеет несколько экстремумов. Их анализ на отрезке (N_{MIN}, N_{MAX}), который определяет область изменения аргумента, позволяет определить максимум и минимум стоимости инфокоммуникационной системы.

Кривая $F_1(N)$ представляет собой монотонно убывающую функцию. Характерный пример такой зависимости – стоимость одного канала по мере роста емкости пучка СЛ

[21]. Функция $F_2(N)$, напротив, монотонно возрастает. Подобный характер графика присущ затратам на кабельную линию в зависимости от ее протяженности [37]. Если аппроксимировать обе функции непрерывными кривыми – $f_i(N)$, то их сумма будет иметь всего один экстремум. Более того, часто аппроксимация осуществляется при помощи метода наименьших квадратов [68], за счет которого выбирается линейная функция. Тогда – рисунок 2.40 – функция $f(N)$ внутри отрезка (N_{MIN}, N_{MAX}) не будет иметь ни максимума, ни минимума.

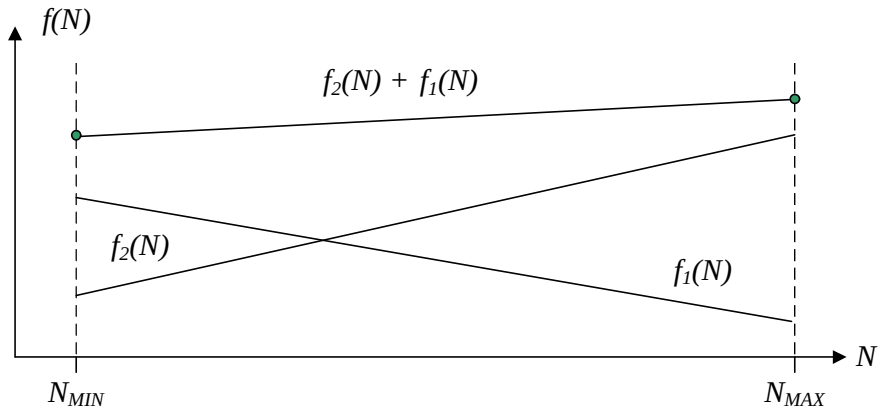


Рисунок 2.40. Сумма двух линейных функций

Разработка методов аппроксимации результатов измерений, представимых в виде ступенчатых функций, объясняется, по крайней мере, двумя причинами. Во-первых, до появления доступных средств вычислительной техники провести расчеты по формулам (2.23) и (2.28) не представлялось возможным, если количество слагаемых исчислялось, например, сотнями. Работа становилась очень трудоемкой, а вероятность возникновения ошибок – существенной. Во-вторых, ступенчатая функция (до построения графика) не позволяет судить о характере исследуемого процесса. С этой точки зрения аналитические выражения выглядят предпочтительнее.

В настоящее время результаты подавляющего большинства измерений фиксируются в той форме, которая позволяет эффективно применять средства вычислительной техники. В подобных ситуациях целесообразно оперировать ступенчатыми функциями. Такой подход не исключает применения методов аппроксимации результатов измерений, которые были апробированы в течение нескольких столетий, для решения некоторых задач.

Проблемы эксплуатируемой транспортной сети выявляются в процессе системного анализа [2, 69, 70]. Основанием для отнесения изучаемой проблемы к задачам системного анализа служит тот факт, что проектировщику приходится анализировать большой объем информации различной природы. Кроме того, используемые искусственные приемы (в частности, декомпозиция телекоммуникационной сети) также характерны для системного анализа. Один из принципов системного подхода заключается в абсолютном приоритете конечной цели. При анализе проблем эксплуатируемой транспортной сети этот постулат, в первую очередь, следует рассматривать как направленность полученных результатов на выделение основных этапов модернизации инфокоммуникационной системы в целом.

2.4.3. Этапы модернизации эксплуатируемой сети

Выделение этапов модернизации эксплуатируемой транспортной сети – часть общей задачи. Она заключается в обеспечении эффективной эволюции инфокоммуникационной системы. Это обстоятельство подчеркивает существенную связь процессов модернизации транспортной и коммутируемых сетей. Далее предполагается, что все основные этапы развития инфокоммуникационной системы уже определены. Тогда задача заключается в

том, чтобы оптимально определить соответствующие этапы модернизации транспортной сети.

Предположим, что модернизируемая инфокоммуникационная система состоит из транспортной и только одной коммутируемой сети – телефонной. Структуры обеих сетей показаны в верхней части рисунка 2.41. Территориально площадки размещения каждой пары "СУ – РАТС" с идентичными номерами совпадают. Телефонная сеть состоит из пяти аналоговых РАТС. Предполагается, что Оператор не собирается осваивать рынки услуг обмена данными и передачи видеоинформации. Это означает, что основная задача модернизации телефонной сети заключается в замене аналоговых РАТС цифровыми коммутационными станциями. В рассматриваемой модели все пять эксплуатируемых РАТС соединены между собой аналоговыми каналами. В транспортной сети все СУ связаны между собой по принципу "каждый с каждым". Иными словами, структуры транспортной и коммутируемой сетей полностью совпадают.

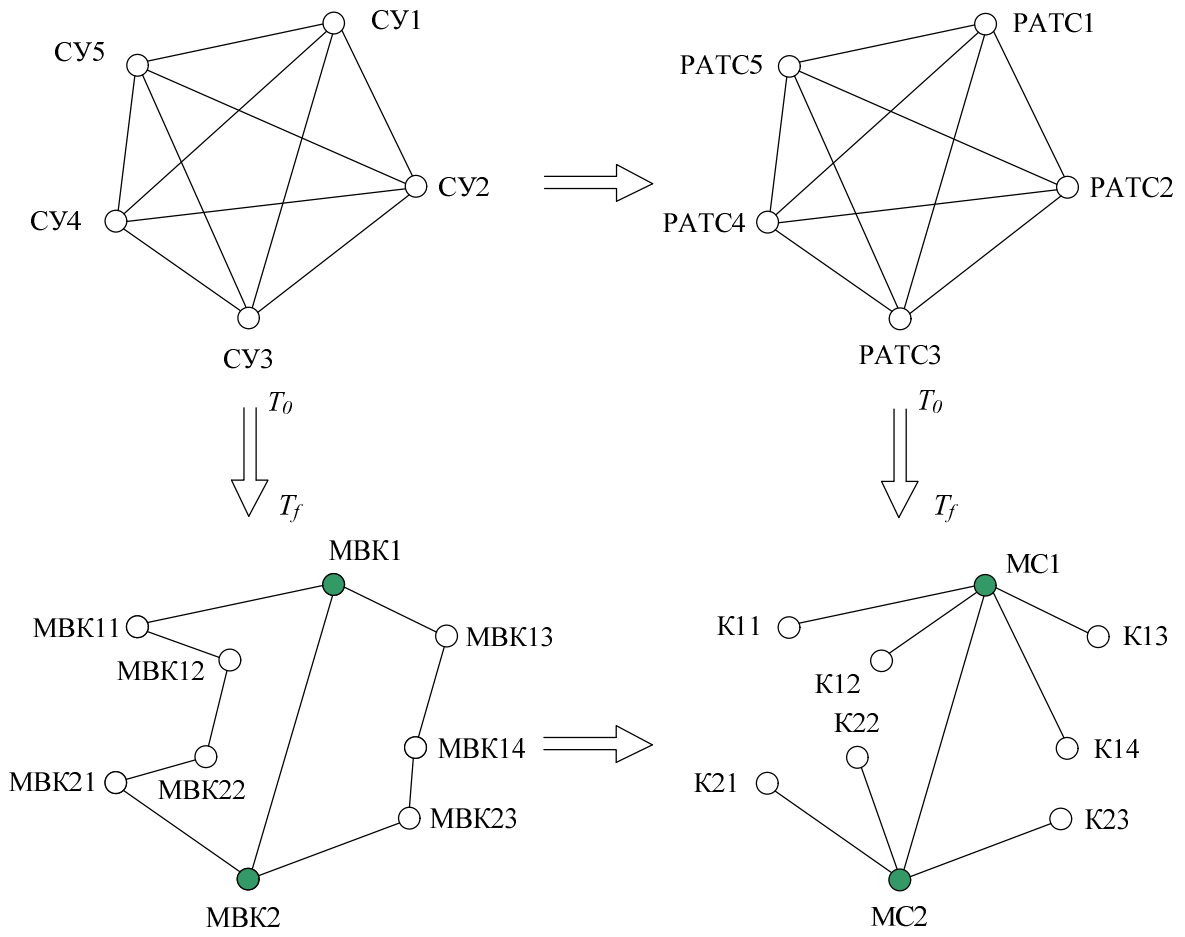


Рисунок 2.41. Исходное состояние и результаты модернизации транспортной и коммутируемой сетей

Вертикальные стрелки между эксплуатируемыми сетями и моделями, которые будут созданы в процессе модернизации, снабжены обозначениями, начинающимися с большой буквы "T". Она, как и ранее, используется для обозначения моментов времени. Индекс "0" указывает на начало модернизации, а "f" – на момент завершения проекта.

Допустим, что расчет телефонной сети (его принципы рассматриваются в третьей главе монографии) позволил выбрать ее оптимальную структуру, которая показана в правой нижней части рисунка 2.41. Решение, намеченное для практической реализации, основано на установке двух цифровых коммутационных станций большой емкости, в каждую из которых включаются несколько выносных концентраторов. Далее необходимо опреде-

лить структуру транспортной сети, которая позволит эффективно реализовать связь между МС, а также обеспечить подключение к ним всех выносных концентраторов. Предположим далее, что выбранная структура соответствует кольцу с хордой. Такая структура представлена в левой нижней части рисунка 2.41. Функции сетевых узлов выполняет оборудование МВК. Здесь следует упомянуть два существенных момента:

- процесс выбора оптимальных структур для транспортной и коммутируемых сетей осуществляется итерационно с учетом основной цели – минимизации затрат на модернизацию инфокоммуникационной системы в целом;
- способы решения задач, которые связаны с поиском оптимальной структуры транспортной сети, рассматриваются ниже – в параграфе 2.4.8.

Данные уточнения позволяют перейти к задаче выделения этапов реализации той транспортной сети, структура которой считается оптимальной. На рисунке 2.42 приведен пример решений, которые предлагаются на первом этапе модернизации транспортной и коммутируемой сетей. Сначала аналоговая РАТС1 заменяется цифровой МС1. В это же время вводятся в эксплуатацию два выносных концентратора – К12 и К13. Единица в качестве индекса внизу обеих стрелок указывает на то, что рассматриваемые структуры обеих сетей создаются на первом этапе их модернизации.

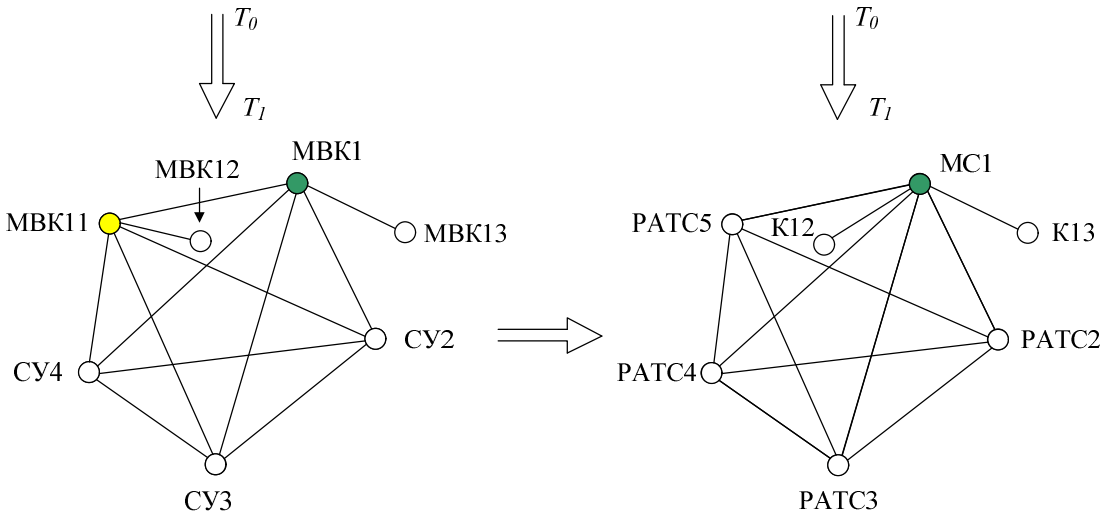


Рисунок 2.42. Первый этап модернизации транспортной и коммутируемой сетей

Допустим, что организация цифровых СЛ между концентратором К12 и опорной коммутационной станцией возможна только в том случае, если оборудование СУ5 будет заменено мультиплексором МВК11. Через этот мультиплексор за счет организации полупостоянных соединений будет создана линия передачи между К12 и МС1. На первом этапе модернизации коммутируемой сети оборудование РАТС5 не заменяется. Тем не менее, соответствующий СУ должен быть заменен из-за невозможности организации цифровых трактов напрямую МС1 и К12. Данный пример иллюстрирует важный аспект эволюции инфокоммуникационной системы: модернизация транспортной сети обычно осуществляется превентивно. Иными словами, темпы замены транспортных ресурсов, как правило, должны превышать скорость модернизации коммутируемых сетей. Этот вывод подтверждается статистикой, касающейся цифровизации сетей местной связи.

Во фрагменте транспортной сети, охватывающем МВК1, МВК11, МВК12 и МВК13, реализована древовидная топология, которой свойственны низкие показатели надежности. В частности, обрыв кабеля на участке между МВК1 и МВК11 приводит к тому, что без связи остаются абоненты РАТС5 и концентратора К12. С этой точки зрения показатели надежности модернизируемой транспортной сети – до формирования предусмотренных проектом колец – становятся ниже, чем в эксплуатируемой инфокоммуникационной системе.

Если такая ситуация не может считаться приемлемой, Оператор может выбрать одно из следующих решений:

- сразу построить транспортную сеть в полном объеме, реализовав структуру, изображенную в левой нижней части на рисунке 2.41;
- построить одно из колец, чтобы обеспечить высокие показатели надежности в новом фрагменте транспортной сети.

Второе решение, в свою очередь, может быть получено за счет реализации разных вариантов. Например, для рассматриваемой модели возможен подход, иллюстрируемый рисунком 2.43. На нем изображена только структура транспортной сети. Очевидно, что отличие предлагаемого решения от структуры транспортной сети, которая должна быть построена в результате модернизации инфокоммуникационной системы, заключается только в отсутствии хорды – линии передачи между МВК1 и МВК2. Эта линия передачи может быть построена позже.

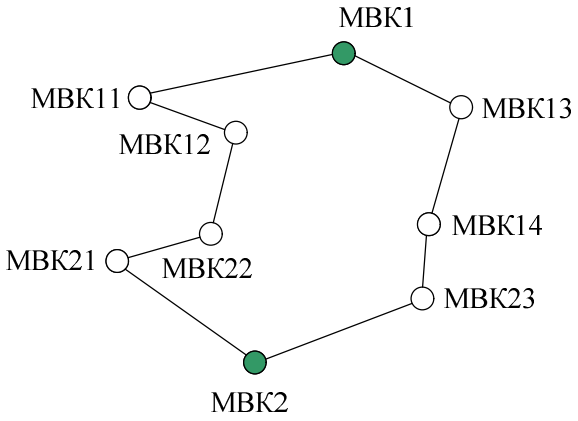


Рисунок 2.43. Построение одного кольца в транспортной сети

Другое решение предусматривает отступление от заранее выбранной – оптимальной – структуры транспортной сети. Например, между МВК12 и МВК13 строится линия передачи, позволяющая сформировать кольцо, объединяющее только новые элементы транспортной сети. Соответствующая трасса показана пунктирной линией в левой части рисунка 2.44. В правой части этого же рисунка приведена структура транспортной сети к моменту полного завершения процесса модернизации всей инфокоммуникационной системы.

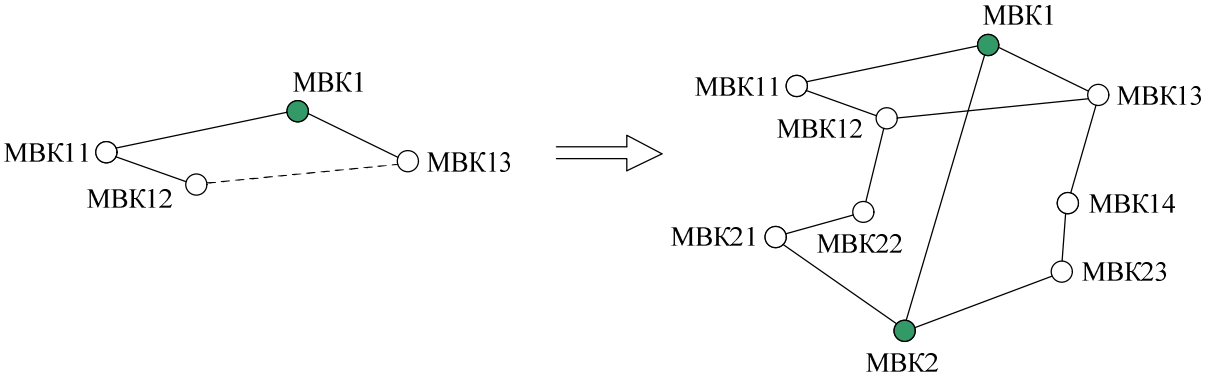


Рисунок 2.44. Построение кольца для объединения новых элементов транспортной сети

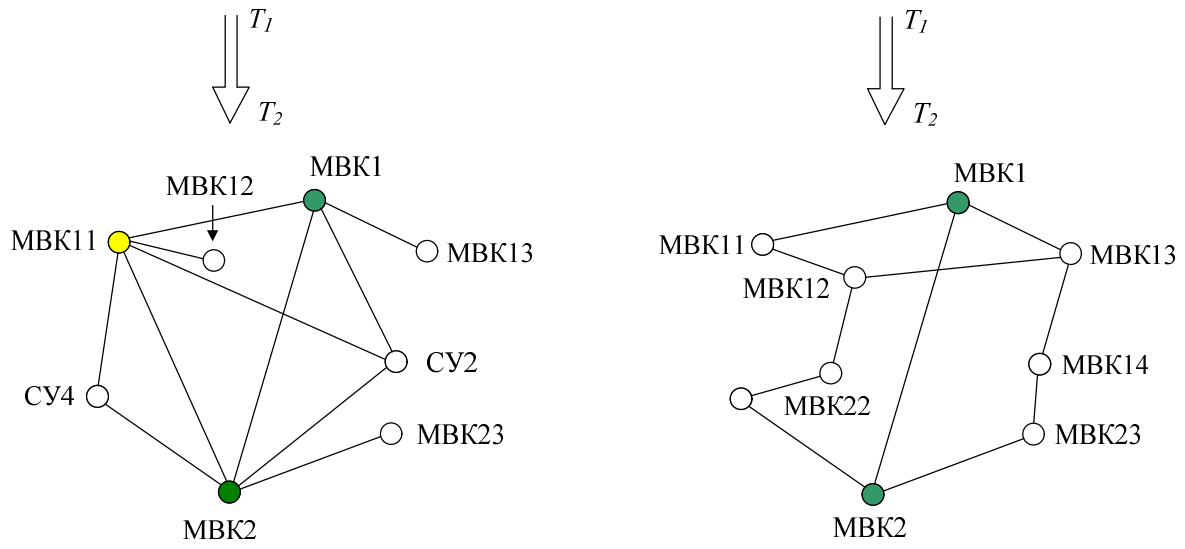
Экономический эффект за счет реализации подобного решения проявляется в виде минимизации начальных инвестиций на модернизацию транспортной сети. К моменту замены всех РАТС суммарные капитальные затраты возрастут (по сравнению с теми, которые были определены для оптимального решения) за счет построения "лишней" линии пе-

редачи между МВК12 и МВК13. Дополнительные капитальные затраты могут быть минимизированы, если отказаться от линии передачи между МВК1 и МВК2. Правда, такой подход не всегда приемлем.

Следует подчеркнуть, что реализация транспортной сети, которая ориентирована на конечную цель модернизации инфокоммуникационной системы, при замене первой РАТС1 позволяет, при необходимости, менять планы по времени установки МС2 и выносных концентраторов. Это обстоятельство можно считать весьма существенным с точки зрения выбора окончательного варианта развития транспортной и коммутируемой сетей.

Вернемся к рисунку 2.42. Он иллюстрирует результаты первого этапа модернизации коммутируемой сети. С практической точки зрения необходимо проанализировать еще четыре этапа эволюции коммутируемой сети; обычно РАТС заменяются последовательно – через интервалы времени: T_2, T_3, T_4, T_5. В общем случае количество этапов равно K. Для выбранной модели $K = 5$. Буквой "L" обозначено количество этапов, которое необходимо для модернизации транспортной сети. Очевидно, что $L \le K$. Второй этап реконструкции коммутируемой сети теоретически может заключаться в замене одной из станций: РАТС2, РАТС3, РАТС4 или РАТС5.

На рисунке 2.45 показаны возможные варианты модернизации транспортной сети для того случая, когда заменяется РАТС3. Такой выбор определяется практическими соображениями, которые обсуждаются в третьей главе монографии. В первом случае после завершения начального этапа модернизации инфокоммуникационной системы структура транспортной сети соответствует топологии, приведенной на рисунке 2.42. Во втором случае структура транспортной сети определяется моделью, изображенной на рисунке 2.44. Предполагается, что вместе с МС2 в эксплуатацию вводится концентратор К23. Обозначение T_2 указывает на тот факт, что рассматривается второй этап реализации проекта по модернизации инфокоммуникационной системы.



а) Транспортная сеть смешанной структуры

б) Кольцевая транспортная сеть

Рисунок 2.45. Модернизация транспортной сети при замене РАТС3

Вариант (а) основан на использовании древовидной структуры транспортной сети. Это означает, что надежность транспортной сети продолжает снижаться. Несомненным плюсом подобного пути развития транспортной сети следует считать минимизацию капитальных затрат на решение задач, которые свойственны второму этапу модернизации инфокоммуникационной системы.

Кольцевые топологии, иллюстрируемые вариантом (б), обеспечивают высокую надежность функционирования транспортной сети. Характерный недостаток решений такого рода – более высокие затраты по сравнению вариантом (а). Во-первых, необходимо

установить оборудование МВК вместо тех СУ, которые можно было заменить позднее. Во-вторых, приходится превентивно организовывать некоторые линии передачи, чтобы "замкнуть" кольца. Реализация варианта (б), по всей видимости, потребует еще раз пересмотреть структуру транспортной сети, которая будут создана к моменту замены всех пяти аналоговых РАТС.

В настоящее время не существует общепринятой методики, которая позволила бы выбрать оптимальный вариант модернизации транспортной сети. Выбор решения часто основан на эвристических соображениях [71]. Эвристические и апробированные (в практике планирования сетей электросвязи) экономико-математические методы следует рассматривать как взаимодополняющие.

Для формализации задач по выделению отдельных этапов модернизации сетей (как транспортной, так и коммутируемых) может оказаться полезным вепольный анализ [72, 73]. Термин "веполь" образован из двух слов: "вещество" и "поле". Обычно веполем называют минимально управляемую техническую систему, которая состоит из двух объектов и энергии их взаимодействия [73]. Для транспортной сети объектами могут быть СУ и/или линии передачи. Объекты принято обозначать символами B_i. Энергию, которая связывает объекты B_i и B_j, целесообразно записать как $П_{ij}$. Простейший веполь показан на рисунке 2.46. В левой части этого рисунка показана модель, полезная для отображения связи двух СУ. В правой части похожая модель иллюстрирует процесс замены эксплуатируемого СУ новым оборудованием, служащим для построения современной транспортной сети.

а) Модель связи двух СУ б) Модель замены СУ

Рисунок 2.46. Модели фрагментов транспортной сети как веполи

Двунаправленная стрелка для варианта (а) отражает обмен информацией между СУ в одной транспортной сети. В вепольном анализе понятия "энергия" и "информация" тождественны. В рассматриваемом примере трактовка обозначения $П_{12}$ как информации (полезной или служебной) представляется вполне логичной. Вариант (б) служит хорошей моделью для иллюстрации процесса замены СУ. Места расположения элементов B_1 и B_2 совпадают (иногда для подобных моделей используются обозначения B и B'). Стрелки указывают на последовательность выполняемых операций. Обозначение $П_{12}$ можно трактовать как совокупность всех видов работ по планированию сети. Взаимодействия некоторых типов делят на неэффективные и нежелательные – варианты (а) и (б) на рисунке 2.47. Стрелки, как и на рисунке 2.46, отражают направления взаимодействия.

а) Неэффективные виды взаимодействия б) Нежелательные виды взаимодействия

Рисунок 2.47. Неэффективные и нежелательные виды взаимодействия

Все элементы рассмотренных выше моделей можно заменить символами, которые приведены на рисунке 2.47. Приписав каждому элементу модели некую меру (например, величину капитальных затрат), несложно провести сравнение основных путей развития

транспортной сети. Кроме того, структура сети, изображенная в виде совокупности веполей, становится более наглядной.

В том случае, когда в транспортной сети необходимо изменить технологию обмена информацией, задача выбора оптимального решения может стать более простой. Создание новой транспортной сети в полном объеме в течение единственного этапа модернизации инфокоммуникационной системы похоже на "нулевой цикл" при строительстве дома. Верхние этажи будут построены не так быстро, а фундамент должен быть сделан в полном объеме.

Интересный способ повышения окупаемости затрат на "нулевой цикл" – организация платной парковки до завершения строительства нового здания. Аналогичное решение для транспортной сети заключается в сдаче в аренду ресурсов, которые еще не востребованы коммутируемыми сетями. Полезная возможность транспортной сети – в отличие от фундамента – наращивание ресурсов по мере необходимости. С этой целью могут предусматриваться резервные волокна. Кроме того, существенное повышение пропускной способности транспортной сети может быть обеспечено за счет установки оборудования спектрального уплотнения [74].

2.4.4. Паспортизация транспортных ресурсов

Исторически сложилось так, что многие Операторы ТФОП в течение длительного периода времени не создавали собственной базы данных с информацией, необходимой для планирования транспортных сетей. В настоящее время ситуация стала меняться. Современные базы данных, как правило, позволяют получить сведения, упрощающие решение ряда проектных задач. В качестве примера в таблице 2.4 приведен перечень тех статистических данных, которые были использованы для анализа транспортной сети в одном из сельских муниципальных районов.

Таблица 2.4. Пример статистических данных для сельской транспортной сети

Основные показатели транспортной сети, используемые для ее анализа	Номер СУ в транспортной сети		
	1	2	3
Длина линии передачи	23 км	12 км	37 км
Дата создания линии передачи	1990 год	1979 год	1985 год
Тип линейных сооружений	КЛС [1)]	ВЛС [2)]	РРЛ
Тип систем передачи	ИКМ-30	В2-2	–
Нормативное количество каналов	24	6	22
Эксплуатируемое количество каналов	30	3	30
Прогноз количества каналов на 10 лет	30	15	20
Оценка состояния транспортной сети	4 балла	1 балл	3 балла

Примечания:
1) КЛС – кабельная линия связи.
2) ВЛС – воздушная линия связи.

Статистическая информация относится к пучкам СЛ только трех оконечных станций (ОС). Они связаны с центральной станцией (ЦС) линиями передачи транспортной сети, которые образованы за счет использования разных технических средств. Длина линии передачи указывается как ее протяженность. Обычно в базе данных содержится также информация о расстоянии между коммутационными станциями *"по прямой"*. Среднее значение длины линии передачи для трех СУ составляет 24 км. Для этой величины характерна существенная дисперсия.

Год построения линии передачи обычно определяет момент ввода в эксплуатацию соответствующего фрагмента транспортной сети. В базе данных должны содержаться сведения, касающиеся проведения основных работ по ремонту или модернизации линий передачи.

Тип линейных сооружений различен для всех трех линий передачи. Используются КЛС, ВЛС, а также РРЛ. В базу данных обязательно включаются сведения о типе среды распространения сигналов (марка кабеля или провода, диаметр проводников, названия и адреса Поставщиков, а также другая информация, которая представляет практический интерес).

Тип систем передачи определяет вид образуемых каналов. Системы передачи с импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ) обеспечивали эффективное построение линий передачи в составе транспортной сети. В рассматриваемом примере такое оборудование используется только в СУ1. Линия передачи для СУ3 образована устаревшей системой передачи, которая была разработана для организации двух дополнительных каналов ТЧ по физическим цепям ВЛС. Для СУ3 тип систем передачи не указан. Это означает, что соответствующее оборудование входит в состав РРЛ. В базу данных включаются сведения о системе передачи (тип, емкость, основные технические характеристики, названия и адреса Поставщиков, а также иная информация, которая представляет практический интерес).

Нормативное количество каналов определяется в результате расчета. Этот расчет включает оценку числа каналов для прогнозируемой нагрузки и установленных норм на качество обслуживания вызовов. К полученной оценке прибавляется количество каналов, которые предполагается сдавать в аренду.

Эксплуатируемое количество каналов определяется объемом доступных ресурсов. Оно может быть выше нормативного количества каналов из-за модульности систем передачи. Такая ситуация складывается с линиями передачи для СУ1 и СУ3. В ряде случаев – в нарушение установленных норм – эксплуатируемое количество каналов ниже требуемого значения. В частности, для линии передачи в СУ2 необходимо удвоить численность эксплуатируемых каналов.

Прогноз количества каналов, необходимого через десять лет, осуществляется на базе методов, изложенных в разделе 2.2. Кроме того, должны быть учтены прогностические оценки для коммутируемых сетей (они рассматриваются в третьей главе монографии). Для СУ1 не ожидается существенного роста трафика. По этой причине имеющийся запас (шесть каналов) достаточен на десятилетний период развития телефонной сети. Иная ситуация складывается с СУ2: требуется существенное развитие транспортной сети. Для СУ3 ожидается снижение трафика. Такое явление характерно для некоторых сельских районов по экономическим и демографическим причинам. Это означает, что в течение десяти следующих лет коэффициент использования имеющихся транспортных ресурсов будет снижаться.

Оценка состояния транспортной сети производится субъективно с учетом основных эксплуатационных проблем всех линий передачи. В нижней строке таблицы 2.4 приведены искомые оценки по пятибалльной шкале. Их можно считать ожидаемыми, проанализировав все приведенные выше показатели транспортной сети. Очевидно, что в первую очередь следует обратить внимание на модернизацию линии передачи, которая оканчивается в СУ2. Если все три СУ будут объединяться одним кольцом, то заметно улучшатся показатели соответствующего фрагмента транспортной сети. Правда, такое решение связано со значительными инвестициями.

Паспортизация транспортных ресурсов позволяет эффективно использовать опыт, который накоплен в процессе реализации удачных проектов. Такая возможность возникает при условии, что для удачного проекта (аналога) удается выделить характерные признаки. Допустим, что распределение длин линий передачи для аналога представимо ступенчатой функцией – $F_A(l)$. Эта функция определяется по гистограмме, которая строится на основе статистических данных. Пример гистограммы, который базируется на статистической информации о длинах СЛ одной из сельских транспортных сетей в Северо-западном Федеральном округе, приведен на рисунке 2.48. Одинаковая амплитуда всех линий по оси ординат $(h=1)$ означает, что количество эксплуатируемых пучков СЛ разной длины идентично. При округлении длин этих СЛ с градацией, например, в пять километров появятся амплитуды, для которых $h>1$.

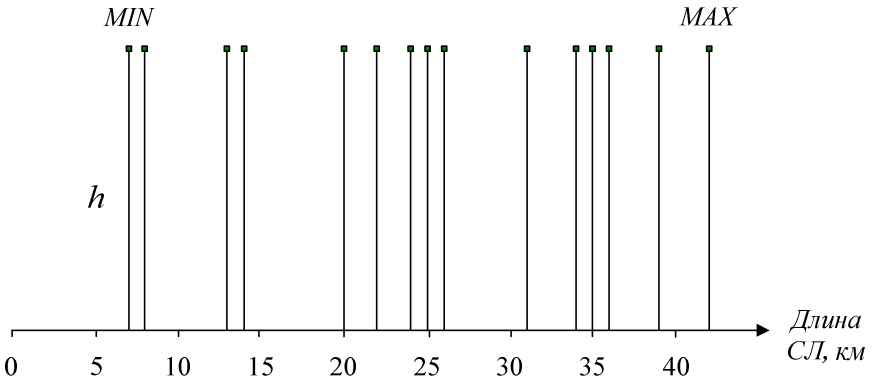


Рисунок 2.48. Гистограмма длин СЛ в сельской транспортной сети

Предположим, что для исследуемой транспортной сети был найден ряд удачных решений, касающихся модернизации инфокоммуникационной системы. Возникает вопрос о возможности тиражирования апробированных решений на другие транспортные сети. По всей видимости, необходимым условием становится близость распределения длин СЛ. Для оценки совпадения подобных функций распределений целесообразно использовать непараметрический критерий Уилкоксона [68, 75]. Обычно он применяется для проверки принадлежности двух выборок одной и той же генеральной совокупности.

Гипотеза H_0, состоящая в том, что $F_X(x) \equiv F_Y(x)$, проверяется в результате анализа двух выборок – из X и из Y. Первая выборка включает элементы $x_1, x_2, ..., x_n$, а вторая – $y_1, y_2, ..., y_m$. Никакие предположения относительно законов распределения X и Y не вводятся. Значения обеих выборок упорядочиваются вместе по их величинам. Пример, который приведен в [68], оперирует с выборками при $n = 4$ и $m = 5$. Предполагается, что процедура упорядочивания приводит к такой последовательности: $y_5 x_3 x_4 y_1 y_2 x_2 y_4 y_3 x_1$. Если $y_j < x_i$, то такая пара величин образует инверсию. В рассматриваемом примере величины x_i образуют следующее число инверсий [68]:

- x_3 и x_4 – одну (с y_5);
- x_2 – три (с y_2, y_1 и y_5);
- x_1 – пять (с y_3, y_4 y_2, y_1 и y_5).

Контрольной величиной служит полное число инверсий – u. Если гипотеза верна, то величина u не должна существенно отличаться от своего математического ожидания – $u^{(1)}$, которое определяется следующим образом:

$$u^{(1)} = \frac{mn}{2}. \tag{2.29}$$

От гипотезы H_0 следует отказаться, если модуль разницы $\left(u - u^{(1)}\right)$ больше заранее выбранного критического значения – u_α. Это значение для заданного уровня значимости определяется по таблице, составленной для критерия Уилкоксона [68, 76]. Для больших значений m и n (когда значения u_α не табулированы) справедлива такая формула:

$$u_\alpha = z_\alpha \sqrt{\frac{mn(m+n+1)}{12}}. \tag{2.30}$$

Величина z_α определяется по таблицам для нормального закона распределения [68]. Для уровня значимости α величина z_α определяется из уравнения следующего вида:

$$2\Phi(z_\alpha) = 1 - \alpha. \tag{2.31}$$

Критерий Уилкоксона был использован для анализа структурных характеристик транспортных сетей разных уровней иерархии [77, 78]. Полученные результаты служат свидетельством эффективности его применения.

2.4.5. Поддерживаемые виды обслуживания

Слова "поддерживаемые виды обслуживания" применительно к транспортной сети следует рассматривать, по крайней мере, с двух точек зрения. Во-первых, они относятся к видам обслуживания и к отдельным услугам, которые обеспечиваются коммутируемыми сетями. Соответствующие требования существенны для оптимального проектирования транспортной сети. Во-вторых, слова "поддерживаемые виды обслуживания" трактуются как перечень функциональных возможностей, предоставляемых транспортной сетью.

В ряде зарубежных публикаций подчеркивается, что транспортная сеть относится к классу систем *"contentless"* – без информационного наполнения. Причина такого названия заключается в том, что транспортные сети напрямую не связаны с обменом информацией. Тем не менее, именно требования к информационному обмену определяют все важнейшие атрибуты транспортной сети: пропускную способность, качество передачи сигналов и надежность. Перечень функциональных возможностей, которые должны обеспечиваться транспортной сетью, формируется задачами, поставленными Оператором.

Эти задачи могут быть классифицированы разными способами. Учитывая ведущие тенденции развития инфокоммуникационной системы, задачи построения транспортных сетей целесообразно классифицировать по виду используемой технологии коммутации. Тогда можно выделить три типичных решения, касающихся технологий:

- коммутация каналов;
- коммутация пакетов;
- коммутация каналов и пакетов.

Если принято решение о развитии телефонной сети как самостоятельного бизнеса (без поддержки видов обслуживания, касающихся данных и видеоинформации), то переход к пакетным технологиям для модернизации транспортных ресурсов не имеет смысла. Для телефонной связи, пакетные технологии передачи позволяют (не всегда!) сэкономить требуемые канальные ресурсы. Подобный эффект может быть достигнут за счет установки оборудования уплотнения цифровых каналов – DCME [79]. При этом не происходит столь существенного снижения качества связи, как при использовании пакетных технологий. По этой причине для рассматриваемого варианта Операторской деятельности целесообразно модернизировать транспортную сеть на базе современных видов оборудования SDH [33].

Переход к ССП связан с переводом транспортной сети на пакетные технологии. Этот процесс может быть реализован за счет использования разных сценариев. В параграфе 2.4.3 обсуждалась возможность превентивной модернизация транспортной сети. Подобное решение, судя по ряду публикаций [80, 81, 82], принято в некоторых странах для междугородной сети. Очевидно, что для местных сетей оно может стать приемлемым, учитывая структуру затрат на создание транспортных ресурсов для разных уровней иерархии инфокоммуникационной системы. Сценарий реализации транспортной сети, ориентированной на пакетные технологии, можно свести к трем решениям:

- полная замена транспортных ресурсов, которые не способны поддерживать технологии передачи пакетов;
- построение (в дополнение к эксплуатируемой) новой транспортной сети, которая предназначена для переноса трафика ССП;
- сочетание перечисленных выше решений, учитывая конкретные особенности эксплуатируемой инфокоммуникационной системы.

Выбор решения для практической реализации может быть осуществлен, например, после проведения коллективной экспертизы [2]. Результаты коллективной экспертизы целесообразно дополнить анализом полезной стоимости альтернатив [83]. С практической

точки зрения представляет интерес исследование альтернатив на основе подходов, разработанных в теории полезности [84, 85]. Один из важных принципов этой теории состоит в том, что приращение предельной полезности, обусловленное прибавлением некой "единицы блага" (например, тракта ЦСП в транспортной сети), постепенно убывает.

Выбор численной меры полезности представляет собой нетривиальную проблему. Если постановка математической задачи невозможна, то вводятся двоичные отношения. В частности, в [51] такая пара определена как *"ресурсы – эффективность"*. Эта трактовка представляется удачной с точки зрения рассматриваемого объекта – транспортной сети. Целесообразность анализа вопроса, рассматриваемого в этом параграфе, в терминах "ресурсы – эффективность" можно проиллюстрировать для процесса, который показан на рисунке 2.49. Монотонная функция – $F(t)$ представляет собой прогностическую кривую спроса на транспортные ресурсы для гипотетической линии передачи. Процесс изменения объема транспортных ресурсов рассматривается в период времени (t_0, t_f). Пунктирными линиями изображены две ступенчатые функции – $F_1(t)$ и $F_2(t)$. Они иллюстрируют рост пропускной способности линии передачи с учетом того факта, что объем транспортных ресурсов всегда меняется дискретно.

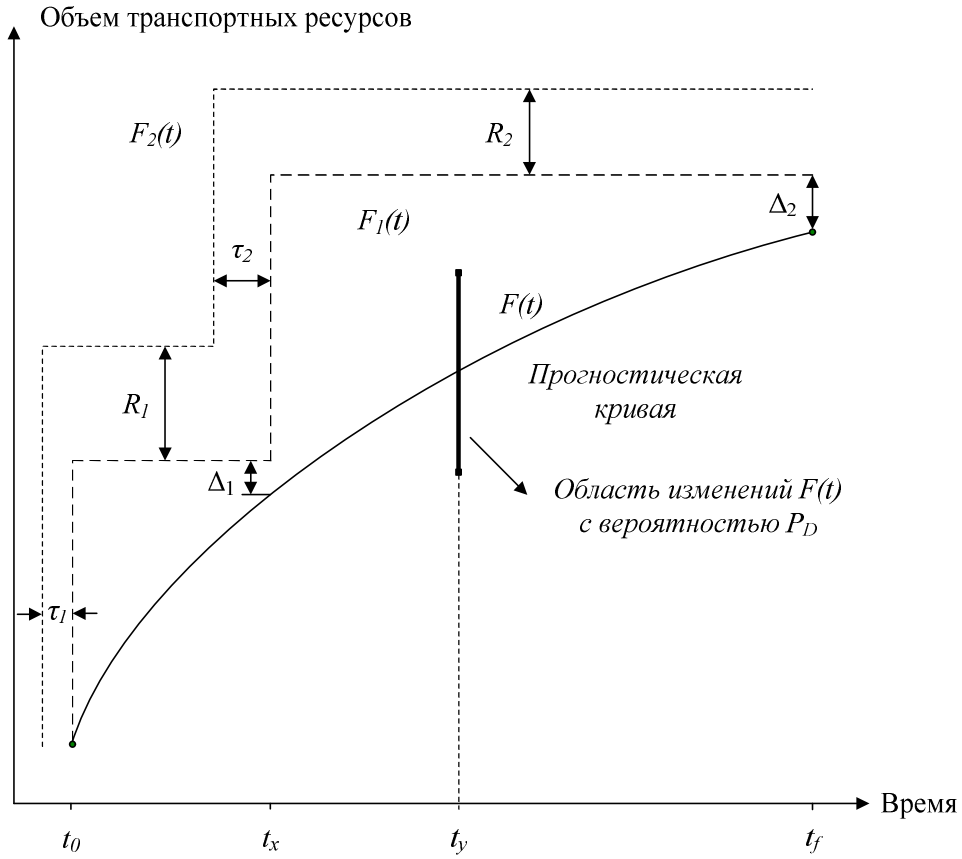


Рисунок 2.49. Изменение объема транспортных ресурсов для гипотетической линии передачи

Функция $F(t)$ определяет ожидаемый тренд исследуемого процесса в диапазоне $t_0 < t \le t_f$. Значение этой функции в точке t_y может рассматриваться как точечная оценка. Область изменения искомой величины с заданной вероятностью – P_D (она отмечена на рисунке 2.49 жирной линией) представляет собой интервальную оценку [68]. Функция $F_1(t)$ описывает процесс создания гипотетической линии передачи, который следует считать экономически целесообразным, если не учитывать риск, возникающий из-за ошибок прогнозирования. В момент времени t_x, когда $F_1(t) - F(t) = \Delta_1$, осуществляется приращe-

ние объема транспортных ресурсов. Предполагается, что следующая подобная операция будет сделана в точке t_f, когда $F_1(t) - F(t) = \Delta_2$. Очевидно, что достоверность подобного прогноза снижается по мере роста t. По этой причине $\Delta_2 > \Delta_1$.

Стоимость транспортных ресурсов продолжает снижаться [8, 9]. Ситуация, когда ощущается дефицит транспортных ресурсов, чревата очень серьезными последствиями для любого Оператора. Поэтому минимизация риска, порожденного дефицитом каналов и трактов, становится актуальной задачей планирования сети. Поведение ступенчатой функция $F_2(t)$ отражает характер превентивного изменения пропускной способности транспортной сети. По отношению к функции $F_1(t)$ обе операции изменения пропускной способности линии передачи осуществляются с опережением τ_1 и τ_2 соответственно. Кроме того, для линии передачи предусматриваются более мощные транспортные ресурсы. Эти различия составляют R_1 при $t < t_x$ и R_2 в диапазоне (t_x, t_f).

Характер роста кривой $F(t)$ и, соответственно, поведение ступенчатых функций $F_1(t)$ и $F_2(t)$ в значительной мере определяются теми видами обслуживания, которые поддерживаются коммутируемыми сетями. Многие Операторы не ограничивают свой бизнес телефонной связью, ориентируясь на обслуживание мультисервисного трафика. Выше было отмечено, что для такого трафика достоверность прогноза требуемой пропускной способности транспортной сети заметно ниже, чем для телефонной нагрузки, анализ изменений которой проводится более ста лет. Это обстоятельство стимулирует интерес к выбору между функциями $F_1(t)$ и $F_2(t)$.

Пропускную способность линии передачи можно оценить с помощью единичной функции полезности (ЕФП). Такой прием используется в *теории полезности* со многими признаками [83]. В англоязычной технической литературе он известен по аббревиатуре MAUT (*Multi Attribute Utility Theory*). Анализ совокупности ЕФП связан с решением задачи многокритериальной оптимизации [49, 50].

Упрощение решения подобных задач может быть достигнуто скаляризацией – выделением одного показателя функционирования исследуемой системы, который можно считать самым важным. Для транспортной сети такое решение вполне приемлемо с практической точки зрения. В качестве ЕФП можно выбрать доход, получаемый за счет предоставления инфокоммуникационных услуг – D. В принципе, ЕФП может быть задана и другими экономическими показателями, косвенно связанными с величиной доходов. Для мультисервисного трафика величину D можно представить следующим образом:

$$D = \sum_{j=1}^{L} w_j d_j(r) - \sum_{i=1}^{K} m_i. \qquad (2.32)$$

Величина $d_j(r)$ определяет уровень дохода от обслуживания трафика $j-го$ вида, для которого выделены транспортные ресурсы – r. Доля трафика $j-го$ вида оценивается весовым коэффициентом w_j. Верхний предел в первой сумме – L определяет количество видов трафика. Для трафика triple-play можно считать, что $L = 3$, если такое допущение не искажает структуру доходов Оператора. Величина m_i определяет выплаты пользователю (штрафы) при отказах в обслуживании из-за невозможности выделения необходимых ресурсов для услуг $i-го$ вида. Штрафы по-разному начисляются для каждого вида трафика. Возможны индивидуальные договоренности об уровне подобных штрафных санкций, что предусмотрено соглашениями SLA. Это означает, что не исключены ситуации, когда $K >> L$.

Второй член в выражении (2.32) влияет на выбор величин R_1 и R_2. Очевидно, что при небольших значениях R_1 и R_2 сумма всех величин m_i максимальна. Эту сумму можно с высокой вероятностью свести к очень малой величине, но для этого потребуются зна-

чительные транспортные ресурсы, которые, как правило, будут использоваться с низкой эффективностью.

Область изменения функции $F(t)$ на отрезке времени (t_x, t_f) определяется при помощи методов математической статистики. Случайный интервал $(-G, +G)$ называется доверительной оценкой исследуемой величины с мерой надежности $1-\alpha$ [68]. Очевидно, что $P_D = 1-\alpha$. Следует подчеркнуть, что с практической точки зрения интересна величина $+G$. Она равна значению z_α из формулы (2.31). Это означает, что соотношение (2.31) позволяет оценить необходимые транспортные ресурсы, если задана вероятность P_D.

В качестве примера рассмотрим задачу расчета транспортных ресурсов для линии передачи, в которой значение функции $F(t_x)$ составляет 120 Мбит/с. Тогда в точке t_x уровень функции $F_1(t)$ должен скачком возрасти до номинала 155 Мбит/с, который стандартизован для современных ЦСП [42, 43]. Не исключено, что естественный запас, равный $F_1(t_x) - F(t_x)$, будет достаточен для минимизации последствий, обусловленных ошибкой прогнозирования. Для рассматриваемого примера запас пропускной способности составляет 35 Мбит/с, то есть почти 30%. Тем не менее, сложность достоверного предсказания спроса на некоторые виды широкополосных услуг не позволяет считать запас в 30% достаточным для любых значений штрафов m_i.

Объем создаваемых транспортных ресурсов меняется дискретно. Его величина в точке t_y обозначена на рисунке 2.50 как r_0. Ступенчатая функция распределения $F(r)$ связана со снижением риска из-за ошибок прогнозирования при увеличении объема пропускной способности транспортной сети.

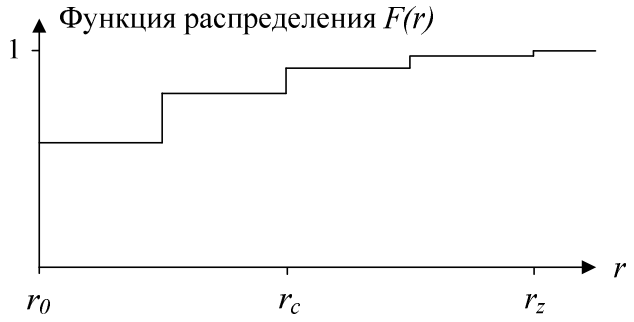


Рисунок 2.50. Возможная аппроксимация функции $F(r)$

Область изменения функции $F(r)$, при необходимости, можно ограничить отрезком (r_0, r_z). Выбираемое значение – r_c удовлетворяет следующему условию: $r_0 \le r_c \le r_z$. Тогда отношение r_z к r_0 определяет коэффициент запаса – k.

Правила начисления штрафов могут варьироваться. Целесообразно ввести оценку в виде математического ожидания штрафа – $M^{(1)}(r)$, которая будет связана с дефицитом транспортных ресурсов. Тогда второй член в выражении (2.32) можно заменить оценкой $M^{(1)}(r)$. Она представляет собой ступенчатую функцию, которая уменьшается с ростом r. Для дальнейших рассуждений целесообразно оперировать математическим ожиданием доходов, которое вычисляется как функция используемых транспортных ресурсов – $D^{(1)}(r)$.

Разница $D^{(1)}(r) - M^{(1)}(r)$ будет ступенчатой функцией, похожей на нижний график, приведенный на рисунке 2.39. Аппроксимация ступенчатых функций $M^{(1)}(r)$ и $D^{(1)}(r)$ монотонными кривыми чревата существенными ошибками. Учитывая простоту сравнения ступенчатых функций, величина r_c определяется из очевидного условия:

$$D^{(1)}(r) - M^{(1)}(r) \to max, \quad r \in (r_0, r_z). \qquad (2.33)$$

Два графика, показанные на рисунке 2.51, позволяют обобщить положения, которые изложены в этом параграфе. Эффективность – вне зависимости от способа ее оценки – имеет максимум, позволяющий рассчитать оптимальный объем транспортных ресурсов. На рисунке 2.51 данный факт отмечен затемненным кружком. Транспортные ресурсы, как правило, наращиваются модульно. По этой причине существует некая область изменения транспортных ресурсов, в пределах которой значение эффективности можно считать постоянным. Снижение эффективности за пределами этой области обусловлено очевидными причинами [51, 87].

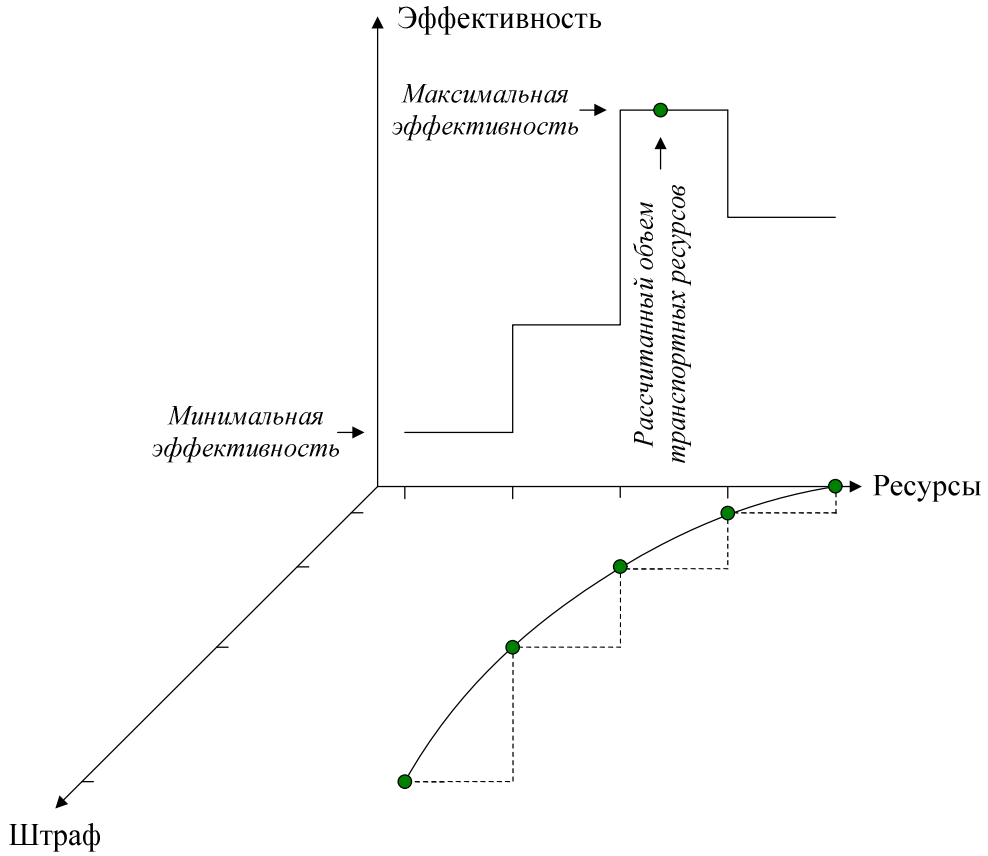


Рисунок 2.51. Аспекты увеличения объема транспортных ресурсов

Зависимость возможного штрафа от объема транспортных ресурсов представляет собой монотонную функцию. Ее можно представить кривой, которая показана сплошной линией в нижней части рисунка 2.51. Соглашения SLA иногда определяют штрафные санкции в виде набора конкретных значений. Тогда следует оперировать ступенчатой функцией. Она показана пунктирной линией. Характер всех приведенных соотношений, дополненный численными оценками, позволяет точнее провести анализ пары "ресурсы – эффективность", используя, в частности, выражение (2.33).

Другой способ классификации сценариев построения транспортной сети основан на трех вариантах ее развития:

- транспортные ресурсы создаются лишь для обеспечения требований, которые определяются перспективами развития коммутируемых сетей;
- при построении транспортной сети предусматривается использование части ее ресурсов другими Операторами;
- часть транспортных ресурсов (постоянно или в течение некоторого времени) арендуется у других Операторов.

Объем необходимых инвестиций – I для этих трех сценариев может оцениваться следующим образом:

$$I = I_0 + x(\Delta I_1 - y\Delta I_2). \qquad (2.34)$$

Слагаемое I_0 определяет капитальные затраты при выборе первого сценария. Для этого сценария $x = 0$. Коэффициент x равен единице при условии, что Оператор принял решения, связанные со вторым или с третьим сценариями. Коэффициент y также может принимать только два значения. Если предпочтителен второй сценарий, то $y = 0$. Тогда следует учитывать величину ΔI_1, которая определяет инвестиции в ту часть транспортных ресурсов, которые будут предоставлены другим Операторам. Для третьего сценария $y = 1$, что позволяет учесть сокращение капитальных затрат, обусловленное использованием ресурсов другого Оператора. Следует напомнить, что плата за арендуемые ресурсы падает [86]. По этой причине третий сценарий построения транспортной сети в ряде случаев следует рассматривать как весьма эффективное решение.

2.4.6. Показатели качества обслуживания

Аспекты качества обслуживания мультисервисного трафика в транспортной сети уже упоминались в предыдущем параграфе. В тексте рекомендации МСЭ Y.1541 [88] содержится таблица, в которой перечислены показатели качества обслуживания, принятые для ССП. Эта таблица рассматривается в третьей главе монографии. Ряд соображений приведен в Приложении 7.

Следует подчеркнуть, что качество обслуживания трафика зависит (в том числе) от характеристик транспортной сети. Еще одна важная тенденция заключается в том, что ряд новых услуг потребует ужесточения некоторых показателей качества обслуживания. В частности, для ТВЧ либо другого перспективного стандарта телевидения, по мнению ряда экспертов, требуется существенно снизить уровень допустимых вероятностей потерь и искажений IP-пакетов. Соответствующие изменения были внесены в текущую версию рекомендации Y.1541.

Требование к снижению искажений IP-пакетов предопределяет выбор оптического волокна в качестве основной среды передачи. Этот постулат не исключает применения (там, где это целесообразно) современных систем беспроводного доступа, а также каналов спутниковой связи.

Вероятность допустимых потерь IP-пакетов для большинства классов обслуживания установлена на уровне 10^{-3} [88]. В тех случаях, когда требуется более низкая вероятность потерь IP-пакетов, объем ресурсов транспортной сети увеличивается. Для количественной оценки этого процесса можно рассмотреть простую модель тракта передачи IP-пакетов в виде однолинейной СМО $M/M/1/k/f_1^0$. Предположим, что емкость буферной памяти – k не может быть увеличена, чтобы не приводить к большим задержкам IP-пакетов. Тогда обеспечение заданной вероятности – π достигается изменением нагрузки – ρ. Величины k, π и ρ – для рассматриваемой модели – связаны между собой хорошо известным соотношением [89]:

$$\pi = \frac{(1-\rho)\rho^{k+1}}{1-\rho^{k+2}}. \qquad (2.35)$$

Транспортные ресурсы, необходимые для обработки IP-пакетов, пропорциональны интенсивности их обслуживания – μ. Величина μ для интенсивности входящего потока – λ определяется так:

$$\mu = \frac{\lambda}{\rho}. \qquad (2.36)$$

Значение μ обратно пропорционально нагрузке. В таблице 2.5 при условии, что $\lambda = 1$ приведены значения ρ и μ для трех значений вероятности потери заявок. Предполагается, что $k = 5$. В последнем столбце таблицы 2.5 приведено соотношение между требуемой величиной μ и ее значением, которое определено при $\pi = 0,00001$. Этот уровень вероятности потери IP-пакетов предложен в текущей версии рекомендации МСЭ Y.1541 с учетом требований телевизионного вещания стандарта ТВЧ.

Таблица 2.5. Параметры СМО для трех значений вероятности потери IP-пакетов

Характеристики исследуемой СМО	Вероятность потери IP-пакетов – π		
	0,001	0,0001	0,00001
Нагрузка ρ	0,339	0,225	0,151
Интенсивность μ	2,95	4,45	6,63
Рост интенсивности μ	1	1,51	2,25

Данные, приведенные в последней строке таблицы 2.5, свидетельствуют о весьма вероятных требованиях по существенному повышению объема ресурсов транспортной сети по мере ужесточения показателей, которые определяют качество обслуживания мультисервисного трафика.

Исследование проблем обеспечения качественной телефонной связи стимулировало разработку Е-модели [90]. Эта модель предназначена для количественной оценки качества телефонной связи с учетом совместного влияния всех факторов, которые определяют характеристики передачи и приема речевых сигналов. Для оценки качества телефонной связи используется скалярная величина – R. Она связана с другой мерой – MOS (средняя экспертная оценка качества речи). Соответствующая зависимость представляет собой нелинейную функцию. Правда, для значений MOS от 2,5 до 4,4, важных с практической точки зрения, справедлива следующая приближенная формула:

$$MOS \approx \frac{R}{20}. \tag{2.37}$$

В рекомендации G.107 [90] приведена таблица, связывающая величины R и MOS. Ее фрагмент воспроизведен в таблице 2.6. Величина MOS оценивается по пятибалльной шкале, а значение R рассчитывается в процентах. Последний столбец таблицы содержит оценку удовлетворенности абонентов качеством телефонной связи.

Таблица 2.6. Соотношения между оценками R и MOS

Нижний предел величины MOS	Нижний предел величины R, %	Степень удовлетворенности абонентов качеством связи
4,34	90	Очень довольны
4,03	80	Довольны
3,60	70	Некоторые недовольны
3,10	60	Многие недовольны
2,58	50	Почти все недовольны

В настоящее время рекомендация G.107 оперирует следующими величинами для вычисления значения R:

- R_0 – соотношение сигнал/шум (оно включает также шум в тракте обмена информацией в помещениях);
- I_s – сочетание всех искажений, которые влияют на передаваемый речевой сигнал;
- I_d – показатель, позволяющий оценить суммарные ухудшения, вызванные задержкой сигнала;

- I_e – величина, учитывающая снижение качества речи из-за использования низкоскоростных кодеков;
- A – слагаемое, обусловленное компенсацией ухудшения качества передачи информации.

Эти пять величин позволяют вычислить искомое значение R по очень простой формуле [90]:

$$R = R_0 - I_s - I_d - I_e + A. \qquad (2.38)$$

Оценка каждой из пяти величин – нетривиальная задача. Обычно используются предварительные вычисления, учитывающие как структуру тракта обмена информацией, так и характеристики установленного оборудования. Величина I_e может быть определена по таблице, содержащей оценки для большинства типов кодеков [90]. В частности, для кодеков с адаптивной ИКМ величина I_e существенно зависит от скорости передачи битов. Для скорости передачи 40 кбит/с $I_e = 2$. При использовании скорости 16 кбит/с $I_e = 50$, то есть возрастает в 25 раз. Не менее важен и алгоритм кодирования. Например, разработан кодек, работающий на скорости 16 кбит/с, для которого $I_e = 7$ [90].

Слагаемое A позволяет учесть оценку абонента в тех случаях, когда снижение качества ожидаемо. Такая ситуация возникает при некоторых видах соединений через сеть мобильной связи и с использованием каналов спутниковой связи. Можно предположить, что величина A будет снижаться. Такая гипотеза обусловлена тем фактом, что требования абонентов к качеству телефонной связи росли на протяжении нескольких десятилетий. В [91] содержатся интересные статистические данные. Они воспроизведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7. Косвенные оценки качества телефонного разговора

Вид соединения в телефонной сети	Эквивалентное расстояние в метрах при обычном общении				
	1923 год	1933 год	1950 год	1985 год	В перспективе
Местное	14	8,3	3,5	2,0	0,6
Междугородное	25	11,7	5,0	2,0	0,6

Повышение величины A может достигаться путем снижения тарифов. Пользователи многих эксплуатируемых систем IP-телефонии мирятся с ухудшением качества связи, если экономят на телефонных разговорах.

Большинство вопросов, касающихся показателей качества обслуживания, следует обсуждать с учетом характеристик мультисервисного трафика. По этим соображениям ряд важных аспектов, напрямую связанных с показателями качества обслуживания трафика ССП, рассматривается в третьей главе монографии.

2.4.7. Пропускная способность

Пропускная способность транспортной и коммутируемой сетей определяется по разным методикам. Более того, смысл словосочетания "пропускная способность" – при декомпозиции инфокоммуникационной системы – не будет идентичным для этих сетей. Для транспортной сети под пропускной способностью следует понимать количество информационных блоков (битов, байтов или пакетов), передаваемых в единицу времени. В любом случае пропускную способность можно оценить привычным способом – в килобитах или мегабитах в секунду. Такой подход продуктивен, по крайней мере, при сравнении технологий, используемых в транспортных сетях.

Для коммутируемой сети часто используют другой термин – производительность. В частности, производительность, выраженная в количестве IP-пакетов, которое устройство распределения информации способно обработать в единицу времени (как правило, за одну секунду), позволяет количественно оценить процессы обслуживания мультисервисного

трафика в коммутационном оборудовании. Задачи оценки производительности систем коммутации, используемых в ССП, рассматриваются в третьей главе монографии.

Снижение стоимости систем передачи большой пропускной способности [8, 9] актуализирует задачу агрегации трафика, поступающего из сети доступа. В технической литературе появился термин "уровень агрегации" – *aggregation level*. Он располагается на следующем уровне иерархии после сети доступа. Если использовать такой термин для ТФОП, то в ней функции агрегации трафика выполняются в местных телефонных сетях. Такое сравнение позволяет лучше уяснить основные проблемы расчета пропускной способности современной транспортной сети. Правда, для постановки задач по расчету пропускной способности целесообразно заменить связку "доступ – агрегация" парой "концентрация – распределение". Рисунок 2.52 иллюстрирует это предложение.

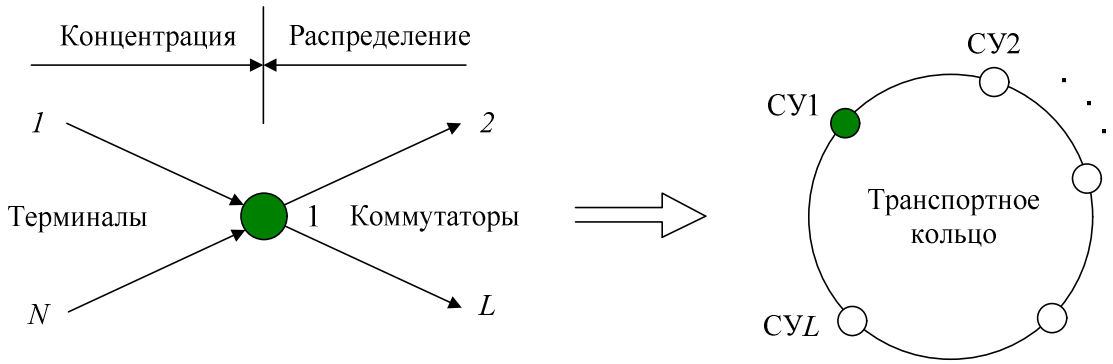


Рисунок 2.52. Два участка местной сети – концентрации и распределения

Весь трафик, создаваемый N терминалами, обрабатывается в первом коммутаторе. В сети установлено L коммутаторов. Очевидно, что $L << N$. Для рассматриваемой задачи вид технологии коммутации не столь существенен. В любом случае коммутатор будет выполнять функции, которые связаны с двумя задачами:

- концентрация трафика для экономии транспортных ресурсов;
- распределение трафика на основании атрибутов заказанной услуги.

В современных транспортных сетях почти все СУ, в которых располагаются коммутаторы, соединяются при помощи колец. Технология передачи сигналов в кольце для рассматриваемой задачи может быть любой. Важное свойство кольца состоит в том, что оно позволяет избежать ошибок проектировщика, которые связаны с распределением трафика между концентраторами. Суть данного утверждения объясняется следующими обстоятельствами:

- статистические данные и прогностические оценки, касающиеся нагрузки всех видов терминалов, позволяют оценить параметры трафика с той точностью, которая достаточна для разработки проектных решений;
- характер распределения трафика между коммутаторами определить сложнее (особенно – в мультисервисной сети).

В телефонной сети общее количество абонентов и их разделение на характерные группы считаются достаточным набором сведений для расчета исходящей, входящей и внутристанционной нагрузки [92, 93]. Величина исходящей нагрузки, создаваемой в первом коммутаторе – $Y_1^{исх}$, определяется с относительной ошибкой $\delta_1^{исх}(Y)$. Нагрузка $Y_1^{исх}$ направляется в коммутаторы с номерами 2, 3, …, L. Каждый из них обслуживает часть исходящей нагрузки – $Y_{1\to j}^{исх}$. Очевидно, что $j = \overline{2, L}$. Соответствующие погрешности вида $\delta_{1\to j}^{исх}(Y)$, как правило, существенно выше, чем уровень $\delta_1^{исх}(Y)$. В [94] предложен алгоритм управления транспортными ресурсами, который позволяет снизить ошибки вида $\delta_1^{исх}(Y)$.

Эффективные процедуры управления транспортными ресурсами проще всего могут быть реализованы именно в сети с кольцевой структурой. Эти процедуры применимы как для исправления ошибок проектирования, так и для адаптивного перераспределения транспортных ресурсов при существенных перегрузках или авариях, которые могут возникать в инфокоммуникационной системе.

Действительно, в транспортном кольце между первым коммутатором и остальными узлами сети передается вся исходящая нагрузка:

$$Y_1^{исх} = \sum_{j=2}^{L} Y_{1\to j}^{исх}. \qquad (2.39)$$

Для обслуживания исходящей нагрузки выделяются транспортные ресурсы, которые (для телефонной связи) целесообразно выразить количеством каналов $V_{1\to j}^{исх}$. Суммарные канальные ресурсы для обслуживания трафика первого коммутатора – $V_1^{исх}$ определяются очевидным соотношением:

$$V_1^{исх} = \sum_{j=2}^{L} V_{1\to j}^{исх}. \qquad (2.40)$$

Относительная ошибка в расчете числа каналов – $\delta_1^{исх}(V)$ примерно равна величине $\delta_1^{исх}(Y)$. Каждый СУ способен менять величины $V_{1\to j}^{исх}$ при соблюдении условия (2.40). По этой причине соответствующие относительные ошибки – $\delta_{1\to j}^{исх}(V)$ могут быть сведены к минимуму.

Эти соображения справедливы и для входящей нагрузки. При планировании сети может быть определена величина входящей нагрузки – $Y_1^{вх}$. Замена цифры "1" на индекс "i" позволяет ввести три матрицы: $\left\|Y_i^{исх}\right\|$, $\left\|Y_i^{вх}\right\|$ и $\left\|Y_i^{вн}\right\|$. Последняя матрица связана с величинами внутристанционной нагрузки.

При планировании транспортной сети следует учесть два важных обстоятельства. Во-первых, необходимо с максимально возможной точностью задать все три матрицы: $\left\|Y_i^{исх}\right\|$, $\left\|Y_i^{вх}\right\|$ и $\left\|Y_i^{вн}\right\|$. Во-вторых, должны быть предусмотрены процедуры управления, которые обеспечат эффективное использование транспортных ресурсов в зависимости от текущего состояния инфокоммуникационной системы.

2.4.8. Структура транспортной сети на разных уровнях иерархии

Задача поиска оптимальной структуры транспортной сети обычно ассоциируется с синтезом графа, отвечающего всем заранее заданным требованиям [21, 43, 87, 95, 96]. В ряде случаев в качестве исследуемой модели целесообразно использовать гиперграфы или гиперсети [97]. Методы решения большинства задач основаны на том, что синтез графа осуществляется без учета ранее созданных вершин и ребер (узлов сети и линий передачи). Такой подход в настоящее время, когда создана основная часть инфраструктуры сети (например, здания для размещения оборудования, кабельная канализация, площадки для установки приемопередающих систем беспроводной связи), нельзя считать приемлемым.

Фактически задача модернизации структуры транспортной сети сводится к поиску графа, в котором – при минимальных изменениях – достигается поставленная цель. К сожалению, поставленную цель не всегда удается сформулировать, используя простые критерии и ограничения. Причина сложившегося положения заключается в том, что достоверно определить перспективы долгосрочного развития инфокоммуникационной системы очень сложно.

При постановке задач, связанных с выбором структуры транспортной сети, следует руководствоваться такими соображениями:

- необходимо тщательно анализировать эксплуатируемые технические средства и инфраструктуру сети, используя, например, SWOT-анализ, основы которого были изложены в параграфе 2.4.2;
- целесообразно так сформулировать преследуемые цели, чтобы синтезируемая структура транспортной сети была максимально инвариантна к возможным изменениям в инфокоммуникационной системе;
- желательно изучить возможности применения методов оптимизации, которые ранее не использовались для решения большинства практических задач из-за ограниченных возможностей средств вычислительной техники.

Сложность соответствующих проблем может существенно меняться для каждой конкретной задачи. Такой вывод основан на результатах работ, выполненных для самых разных инфокоммуникационных систем, различающихся своими масштабами и целями модернизации. Более того, даже при схожести целей модернизации и выборе одинаковых телекоммуникационных технологий сложность конкретной задачи может меняться очень заметно.

В [98] приведена иллюстрация, в которой потенциальный уровень возникающих проблем оценивается тремя параллелепипедами. Они показаны на рисунке 2.53. Данная конструкция продуктивна только для качественного анализа сложности решаемых задач.

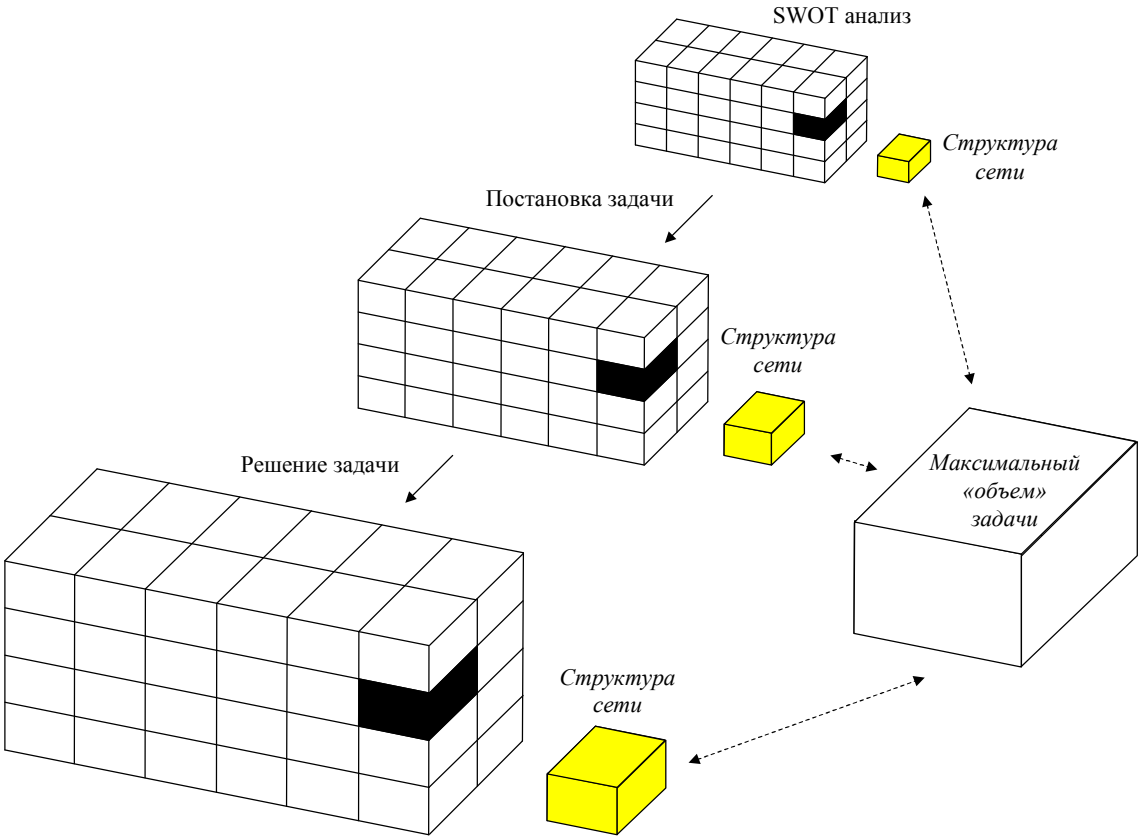
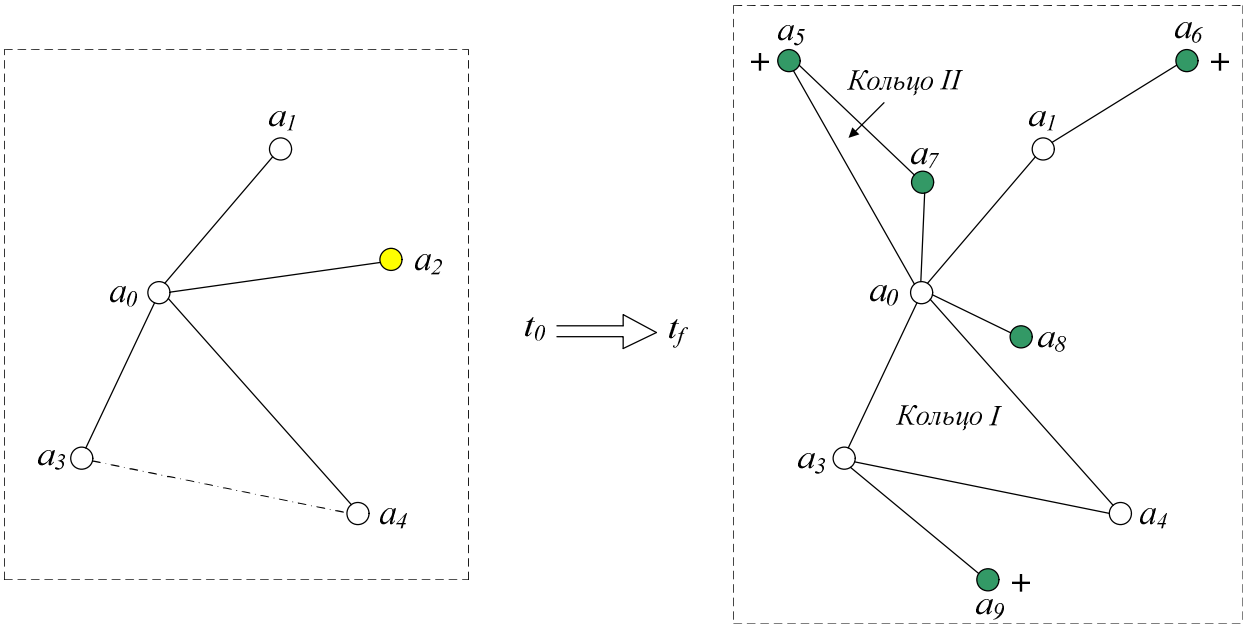


Рисунок 2.53. Оценка сложности выбора структуры транспортной сети

Считается, что сложность каждой задачи пропорциональна объему параллелепипеда, который показан как извлеченный компонент с названием "Структура сети". С другой стороны, сложность задачи целесообразно рассматривать как случайную величину. По этой причине в правой части модели показан параллелепипед, которому приписан максимальный "объем задачи". Это означает, что для конкретного проекта любая из трех задач может оказаться самой сложной.

Для подтверждения высказанных соображений целесообразно рассмотреть модель пристанционного участка аналоговой МС, которую предполагается заменить цифровым коммутационным оборудованием. Похожая модель была использована в первой главе (ри-

сунок 1.24). Одно из важных отличий структуры, показанной на рисунке 2.54, состоит в том, что предусматривается возможность изменения границ пристанционного участка аналоговой МС.



а) Структура эксплуатируемой сети

б) Структура модернизированной сети

Рисунок 2.54. Модель пристанционного участка местной станции

В границах пристанционного участка эксплуатируемой сети показаны пять СУ, которые представлены вершинами графа. Вершина a_0 соответствует месту размещения коммутационной станции. Четыре оставшиеся вершины указывают на точки установки распределительных кабельных шкафов. Между вершинами a_3 и a_4 пунктиром показана линия, которая обозначает наличие межшкафной связи. Структура эксплуатируемой сети сложилась к моменту времени t_0. Теперь необходимо разработать предложения по новой структуре транспортной сети доступа, которая будет реализована к моменту времени t_f, когда аналоговую МС заменит цифровая коммутационная станция.

Допустим, что второй распределительный кабельный шкаф становится ненужным. Этот факт подчеркивает окрас вершины a_2. Кроме того, в новые (расширенные) границы пристанционного участка включены три дополнительные вершины – a_5, a_6 и a_9, которые отмечены знаком "+". Предположим, что в "старых" границах пристанционного участка необходимо разместить два выносных модуля. Им соответствуют вершины a_7 и a_8. Точки размещения новых выносных модулей окрашены темным цветом. Распределительные шкафы, которые отображаются вершинами a_1, a_3 и a_4, также будут заменены выносными модулями.

Очевидно, что SWOT-анализ для сложившейся ситуации не будет тривиальным. Более того, для рассматриваемого примера он сложнее следующего этапа – "Постановки задачи". Подобный вывод может стать справедливым и относительно третьего этапа – "Решения задачи". Эти рассуждения подтверждают высказанные выше утверждения о возможности изменения соотношений между объемами параллелепипедов, показанных на рисунке 2.53.

Постановка задачи для пристанционного участка, границы которого показаны в правой части рассматриваемой модели, может быть сведена к следующим положениям:

- выбрать структуру связи между центром графа a_0 и остальными вершины a_i $(i = 1, \overline{3, 9})$, для которой функция стоимости транспортной и коммутируемой сетей будет минимальна;
- предусмотреть (там, где это возможно) создание кольцевых структур для повышения надежности сети доступа в целом;
- обеспечить требования к надежности, которые заложены в соглашениях SLA, с учетом мест расположения оборудования соответствующих клиентов.

Конечно, этими тремя положениями этап "Постановка задачи" не исчерпывается. Для перехода к следующему этапу сформулированные положения следует "перевести" на язык математики. Тогда можно перейти к решению задачи, используя апробированные или новые экономико-математические методы.

Для первого положения необходимо уточнить словосочетание "функция стоимости транспортной и коммутируемой сетей". Тогда поставленная задача сводится к синтезу структуры графа с заданными свойствами. Для сравнения разных вариантов развития инфокоммуникационной системы при неизменном перечне видов обслуживания, которые предоставляются пользователям, функция стоимости транспортной и коммутируемой сетей – $F(t, x_1, ..., x_n)$ может быть представлена либо капитальными, либо приведенными затратами. Приращения этой функции осуществляются дискретно в те моменты времени, когда начинается новый этап модернизации транспортной и коммутируемой сетей. Кроме того, значения функции $F(t, x_1, ..., x_n)$ определяются атрибутами обеих сетей, которые выражены показателями $x_1, ..., x_n$. Для выбора оптимального варианта следует найти минимум функции $F(t, x_1, ..., x_n)$.

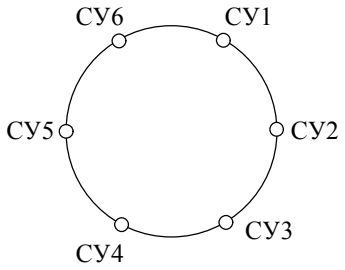
Такой подход к определению функции стоимости оправдан при совпадении видов обслуживания, которые доступны пользователям. Это означает, что доходы Оператора остаются идентичными. Следовательно, их можно исключить при сравнении вариантов модернизации инфокоммуникационной системы. Иная ситуация складывается для тех сценариев развития инфокоммуникационной системы, для которых предусматриваются разные перечни поддерживаемых видов обслуживания. В этом случае потенциальные доходы Оператора могут различаться очень существенно, что необходимо учитывать при выборе функции стоимости вида $F(t, x_1, ..., x_n)$. Очевидно, она должна базироваться на кривых NPV. Иными словами, целесообразно ввести функцию $NPV(t, y_1, ..., y_m)$. Один из важных аргументов этой функции, входящих в совокупность переменных $y_1, ..., y_m$, – риск, для анализа которого используются соответствующие экономико-математические методы [99]. Применение кривых NPV не позволяет однозначно выбрать оптимальное решение за счет поиска экстремума функции стоимости. Необходимо участие ЛПР.

В любом случае приходится анализировать стоимость обоих важных компонентов инфокоммуникационной системы – транспортной и коммутируемой сетей. Это очевидное положение не требует обоснования. Математические преобразования, выполняемые для такой функции стоимости, существенно сложнее. Подробнее этот аспект модернизации инфокоммуникационной системы рассматривается в третьей главе монографии.

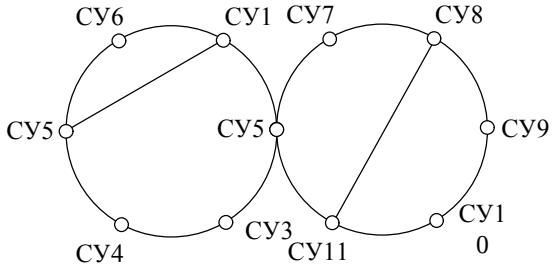
Далее предполагается, что все требования к коммутируемой сети были учтены. Это позволяет определить границы пристанционного участка, количество выносных модулей и места их размещения. Второе положение, сформулированное при постановке задачи, касается организации колец. Наличие в ранее эксплуатируемой сети доступа направления межшкафной связи (пунктирная линия между вершинами a_3 и a_4) позволяет элементарно найти оптимальное решение для организации кольца I, которое показано в правой части рисунка 2.54. Не исключено, что с приемлемыми затратами может быть создано кольцо II. Связь остальных четырех вершин графа с его центром a_0 осуществляется по двум схемам: радиальной и древовидной.

По всей видимости, смешанная структура транспортной сети на уровне доступа (кольцевая, радиальная и древовидная) будет доминировать на начальном этапе развития инфокоммуникационной системы. Затем для повышения надежности сети доступа каждая вершина графа должна быть связана с его центром, как минимум, двумя маршрутами. Кстати, подобное требование предъявляется к междугородной транспортной сети уже в настоящее время [100]. В этой сети между каждой парой СУ предполагается создавать не менее трех возможных путей обмена информацией.

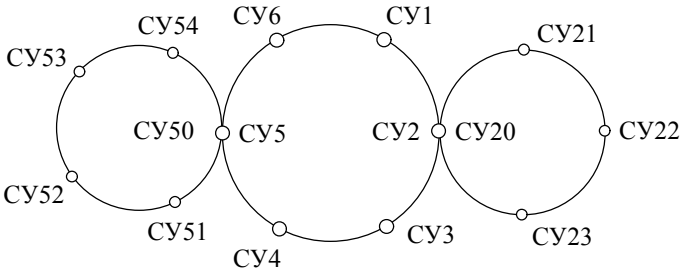
Перспективные структуры местных (городских и сельских) транспортных сетей, в значительной мере, предопределены теми решениями, которые были приняты в процессе цифровизации ГТС и СТС. В городских транспортных сетях широкое применение нашли кольцевые топологии, реализованные за счет прокладки кабелей с ОВ, уплотняемых оборудованием SDH. Процесс цифровизации в сельской местности протекает медленнее, чем в городах. По этой причине и по экономическим соображениям кольцевые структуры в сельской местности создаются редко. Чаще линейные сооружения и системы передачи меняются без пересмотра топологии транспортной сети. В результате доминируют структуры вида "звезда" и "дерево". Ряд графов, отображающих возможные структуры транспортной сети, приведен на рисунке 2.55.



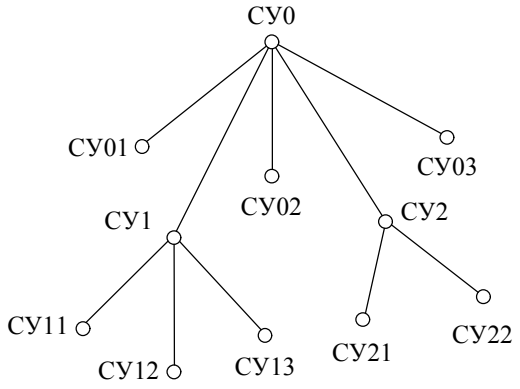
а) Транспортная сеть с одним кольцом



б) Транспортная сеть с двумя кольцами и с хордами



в) Транспортная сеть с кольцами разных иерархических уровней



г) Транспортная сеть со структурами «звезда» и «дерево»

Рисунок 2.55. Примеры структур для местных транспортных сетей

Структуры, показанные на рисунке 2.55, уже рассматривались в этой главе. По всей видимости, следует ввести только один комментарий относительно типов межшкафной связи. В некоторых сетях доступа, построенных за счет прокладки многопарных кабелей, линии межшкафной связи организовывались так, как показано в левой части рисунка 2.56 – вариант (а). Он назван первым типом межшкафной связи. В большинстве учебников и в других материалах приводится второй тип межшкафной связи – вариант (б).

а) Первый тип межшкафной связи б) Второй тип межшкафной связи

Рисунок 2.56. Кольцевая структура и линии межшкафной связи

Очевидно, что заметное повышение надежности сети доступа за счет кольцевой топологии, образуемой при использовании первого типа межшкафной связи, невозможно. Фактически, схема, показанная как вариант (а), позволяет организовать только плоское кольцо [42]. Вариант (б) обеспечивает построение кольцевой структуры с высокой надежностью связи между выносными модулями, которые будут установлены вместо распределительных шкафов.

Модель междугородной транспортной сети можно представить в виде графа с произвольной структурой. Пример такого графа, состоящего из двенадцати вершин, каждая из которых определяет место размещения СУ, показан на рисунке 2.57. Для каждой вершины графа указана ее степень.

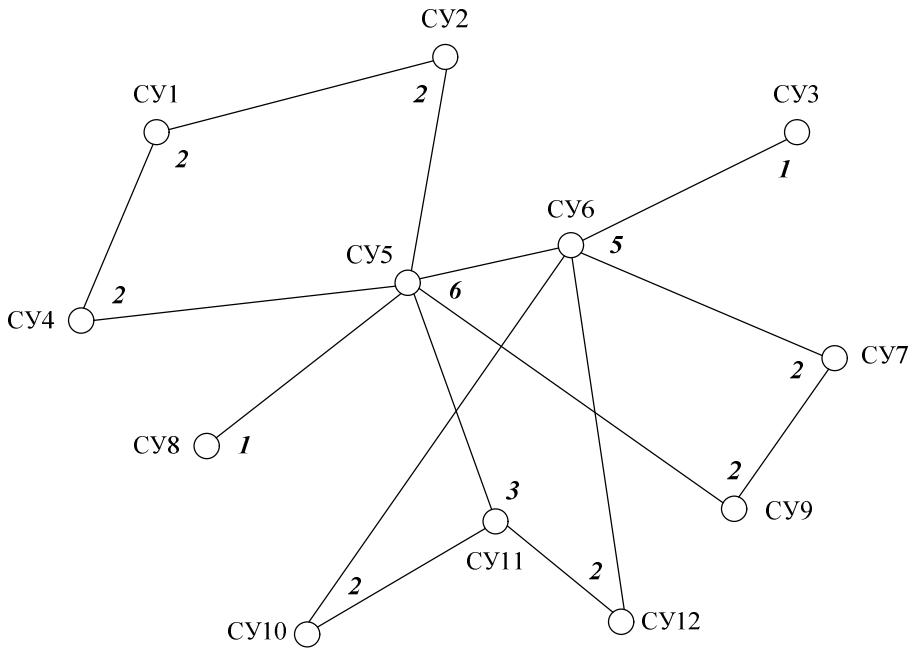


Рисунок 2.57. Фрагмент модели междугородной транспортной сети

Структура междугородной транспортной сети самостоятельно формируется каждым Оператором дальней связи. Тем не менее, можно выделить ряд общих тенденций, суть которых не связана с особенностями Операторской деятельности. Для анализа подобных тенденций следует вернуться к тому моменту времени, когда еще сохранялась монополия на услуги междугородной и международной связи. Транспортная сеть состояла из более чем 600 узлов [100]. Максимальная длина пути, образуемого в этой сети, составляла 12500 км. Основные решения по структуре транспортной сети выбирались Администрацией связи СССР. В транспортной сети было создано 12 территориальных автоматизированных

узлов. Восемь из них находятся на территории России. План развития транспортной сети предусматривал переход к структуре, в которой между парой узлов существовало три (или более) пути обмена информацией.

Для рассматриваемого графа математическое ожидание степени вершин – $R^{(1)}$ будет определяться следующим образом:

$$R^{(1)} = \sum_{j=1}^{N} R(a_j). \tag{2.41}$$

Величина $R(a_j)$ – количество ребер, инцидентных вершине a_j, N – суммарная численность вершин графа. Для графа, который изображен на рисунке 2.57, величина $R^{(1)} = 2,5$. Дисперсия степени вершин – σ^2 определяется по такой формуле:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left[R(a_j) - R^{(1)}\right]^2. \tag{2.42}$$

Эта величина для анализируемой модели составляет примерно 2,083. Различие степеней вершин можно оценить при помощи коэффициента вариации, который составляет 0,577. Предположим, что при модернизации транспортной сети должно быть выполнено условие вида:

$$R(a_j) \geq 3. \tag{2.43}$$

Тогда оптимизационная задача заключается в поиске структуры графа минимальной стоимости, для которого выполняется требование (2.43). Очевидно, что в первую очередь следует обеспечить рост степени третьей и восьмой вершин. При решении подобной задачи интересен подход, который ведет к сбалансированной структуре транспортной сети. Это условие можно сформулировать так:

$$\begin{cases} \sigma^2 \to min \\ R(a_j) \geq 3 \end{cases}. \tag{2.44}$$

Кстати, для ТФОП в США средняя степень вершины междугородной сети лежит в диапазоне от 2,5 до 3 [101]. В общем случае ограничением может служить неравенство $R(a_j) \geq M$, в котором величина M – минимальная степень любой вершины графа.

С практической точки зрения для каждого СУ в междугородной транспортной сети может рассматриваться не более пяти возможных направлений для строительства новой линии передачи. Учитывая высокие инвестиции подобных проектов, целесообразен анализ всех возможных решений – полный перебор допустимых вариантов.

В разделе 2.2 упоминалось, что затраты на создание транспортных ресурсов имеют устойчивую тенденцию к снижению [8, 9]. Это стимулирует снижение количества узлов, выполняющих функции транзита трафика, что, в свою очередь, требует пересмотра ряда принципов построения транспортной сети. В пятом номере журнала "Компьютерная телефония" за 2002 год опубликована заметка "Telecom Italia внедряет крупнейшую в Европе сеть VoIP с Cisco и Italtel". В ней содержатся очень интересная информация о структуре ТФОП в Италии. Она включала 66 транзитных узлов, расположенных по территории страны. Новая сеть, основанная на технологии VoIP, состоит из 24 транзитных узлов (IP Exchange). Это означает, что переход на IP технологию позволяет примерно в 2,75 раза сократить количество транзитных узлов.

Если задачу повышения степени вершин графа объединить с проблемой сокращения количества транзитных точек коммутации, то от перебора возможных вариантов придется отказаться. Необходим новый подход к выбору структуры транспортной сети. Один из возможных путей решения возникающей задачи может быть представлен следующим алгоритмом:

- для совокупности из K узлов междугородной связи (центры всех субъектов Федерации плюс ряд крупных городов) находится оптимальная структура транспортной сети;
- оптимальная структура транспортной сети сравнивается с топологией из L узлов, которая эксплуатируется в настоящее время (по всей видимости, будет выполняться неравенство $K < L$);
- разрабатывается ряд возможных сценариев для поэтапного перехода к новой структуре транспортной сети;
- осуществляется выбор оптимального решения с учетом плана долгосрочного развития инфокоммуникационной системы в целом.

Предлагаемый алгоритм включает в себя только основные этапы модернизации транспортной сети при радикальной смене технологий коммутации и передачи. Тем не менее, существенная сложность оптимизационной задачи несомненна.

Для иллюстрации возникающих проблем можно воспользоваться моделью, которая была представлена на рисунке 2.57. Предположим, что СУ5 и СУ6 были организованы для размещения транзитных коммутационных станций. Допустим, что в сети, основанной на IP технологии, эти станции более не нужны. Тогда в СУ5 и СУ6 следует оставить только средства кроссовой коммутации для формирования новой структуры коммутируемой сети. В качестве гипотетического оптимального решения для коммутируемой сети выбрана модель в виде полносвязного графа. Процесс формирования транспортной сети показан на рисунке 2.58. Он основан по поэтапном переходе к полносвязной топологии за счет использования функций кроссовой коммутации в бывших узлах СУ5 и СУ6. Эти два элемента транспортной сети окрашены темным цветом; они не пронумерованы.

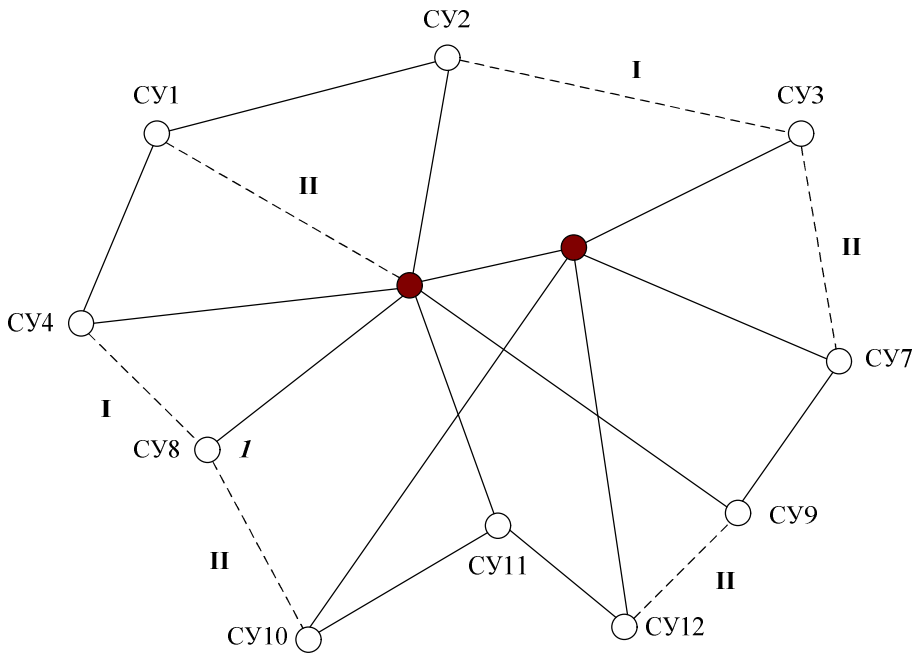


Рисунок 2.58. Модернизация междугородной транспортной сети

Новые тракты, которые должны быть созданы для реализации полносвязной сети, изображены пунктирными линиями. Римские цифры I и II определяют приоритеты строительства соответствующих линий передачи. Структура транспортной сети, благодаря двум узлам кроссовой коммутации, позволяет организовать прямые пучки каналов между каждой парой СУ. Функции установления кроссовых соединений свойственны каждому современному СУ. Это означает, что может быть создано несколько независимых (в смысле надежности) путей обмена информацией между каждой парой коммутационных станций.

Для междугородной транспортной сети найти оптимальную структуру практически невозможно. Во-первых, минимальное количество вершин графа, которые должны быть включены в модель, равно количеству субъектов Федерации. Следовательно, объем тех вычислений, которые позволяют найти самую экономичную структуру сети, превосходит разумные пределы. Во-вторых, процесс модернизации транспортной сети столь большого размера займет существенное время. В течение этого времени изменятся – по крайней мере, численно – те ограничения, которые выбраны при решении поставленной задачи. И даже точное решение, полученное, например, в 2015 году, с большой вероятностью, не будет оптимальным к 2020 году. Возможно, подобные причины привели авторов проекта модернизации транспортной сети США к выводу о целесообразности поиска решения, близкого к оптимальному [101].

Модернизация транспортных и коммутируемых сетей на всех уровнях иерархии инфокоммуникационной системы требует больших инвестиций. В статьях [82, 102 – 106] приводятся сведения, позволяющие рассчитать суммарные затраты на модернизацию транспортных и коммутируемых сетей. По этой причине результаты соответствующего анализа приведены в третьей главе монографии.

Для процесса планирования транспортной сети интересны далеко не все атрибуты применяемых технологий. Основное внимание связано со стоимостью транспортных ресурсов. На сайте компании TeleGeography (http://www.telegeography.com) в публикациях за 14 июля 2009 года можно было найти интересную иллюстрацию, касающуюся арендной платы за тракты Ethernet, которые образованы разными способами. На рисунке 2.59 показаны относительные затраты (без указаний значений стоимости) для решений Ethernet поверх MPLS (EoMPLS), SDH (EoSDH) и DWDM (EoDWDM). Подобные связки технологий иногда обозначают так: EoX – Ethernet поверх некой технологии "X".

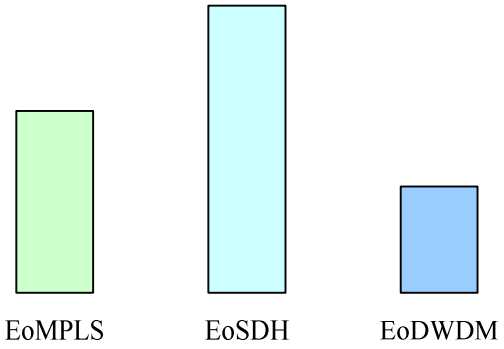


Рисунок 2.59. Соотношение цен на аренду транспортных ресурсов

По всей видимости, соотношение цен на аренду позволяет судить о себестоимости транспортных ресурсов, образованных за счет использования разных технологий. Тогда вывод очевиден: целесообразно использовать решение EoDWDM.

Для большинства практических задач подобное утверждение не будет корректным по ряду причин. В первую очередь, необходимо учитывать имеющиеся ресурсы и уже используемые технологии. Не исключено, что после такого анализа предпочтение будет отдано решению EoSDH. Кроме того, важен учет требований коммутируемых сетей в части пропускной способности и показателей качества обслуживания. По этим причинам выбор технологии для транспортной сети нельзя рассматривать как автономную задачу, которую можно решить без анализа процессов развития инфокоммуникационной системы в целом.

В этом параграфе уместно привести еще одну оценку, которая напрямую не связана с ценами на телекоммуникационное оборудование и кабели связи. Речь идет об одном из аспектов применения выносных модулей при модернизации инфокоммуникационной системы.

Использование выносных модулей, размещаемых в контейнерах, позволяет продать или сдать в аренду освобождающиеся здания, в которых ранее устанавливались АТС. Стоимость недвижимости – особенно в крупных городах – заметно выросла в последние

годы. Голландская компания KPN затратила на модернизацию своей сети 0,9 млрд. евро, а от продажи зданий АТС смогла выручить 1 млрд. евро [107]. В среднем, вместо одной АТС этот Оператор устанавливал 21 контейнер. Другие эксплуатационные компании в Западной Европе ограничились меньшим количеством контейнеров при замене одной АТС: British Telecom (Великобритания) – 15,3, France Telecom (Франция) – 18,3, Telecom Italia (Италия) – 6,8 [107].

Подобные решения не меняют модели транспортной сети доступа. Все возможные структуры на уровне доступа могут быть представлены при помощи графов, показанных на рисунке 2.55. Следует подчеркнуть, что модели транспортной сети инвариантны к виду используемых технологий.

2.4.9. Пропускная способность линий передачи

При расчете пропускной способности линий передачи, соединяющих смежные СУ, следует руководствоваться методами теории телетрафика. Формально, процесс расчета пропускной способности линии передачи в транспортной сети может быть представлен следующим алгоритмом:

- для каждого $i-го$ вида трафика ($i=\overline{1,N}$) определяются как интенсивность поступающего потока заявок – λ_i, так и среднее время их обслуживания – $B_i^{(1)}$;
- каждому $i-му$ виду передаваемого трафика ставится в соответствие некая совокупность показателей качества обслуживания;
- выбираются те дисциплины обслуживания для трафика $i-го$ вида, которые свойственны проектируемым коммутируемым сетям;
- вычисляется аналитически или определяется при помощи имитационного моделирования интенсивность обслуживания – μ, которая гарантирует, что соблюдаются установленные показатели качества обслуживания для трафика всех видов;
- величина μ пересчитывается в величину пропускной способности линии передачи, с учетом технологии, которая используется в транспортной сети.

Для телефонной сети $N=1$, совокупность показателей качества обслуживания представима вероятностью потерь вызовов – π, а дисциплина обслуживания основана на правиле FIFO и отсутствии мест для ожидания в очереди. С учетом этих особенностей сетей телефонной связи алгоритм вычисления пропускной способности линии передачи трансформируется следующим образом:

- параметры λ и $B^{(1)}$ (индекс "i" в данном примере опускается) заменяются величиной интенсивности нагрузки – Y;
- вместо величины μ по первой формуле Эрланга [92] сразу рассчитывается количество линий – V, для которого соблюдается норма на допустимую вероятность потерь вызовов (π);
- рассчитанное значение V используется для выбора номинала пропускной способности линии передачи (например, если $V=25$, можно использовать систему передачи ИКМ-30, для которой $V=30$).

Для мультисервисного трафика, обслуживаемого в форме IP-пакетов, вычисление пропускной способности линии передачи представляет собой очень сложную процедуру. Кроме того, необходимо учитывать плохо прогнозируемый трафик данных и видео, что затрудняет достоверно оценить величины λ_i.

Для телефонной сети величина V при известных значениях Y и π вычисляется по точной формуле. Для транспортной сети, ориентированной на пакетный трафик, который передается в сети ССП, величина пропускной способности может быть получена только за

счет использования приближенных формул. Методика оценки пропускной способности линий передачи, предназначенных для сети ССП, приведена в Приложении 7.

2.4.10. Принципы резервирования ресурсов транспортной сети

При переходе к сети ССП возникает ряд новых задач, касающихся резервирования ресурсов в транспортной сети. В параграфе 2.3.8 были изложены соображения, которые относятся к резервированию ресурсов на уровне сети доступа. Рассматривалась частная задача – обеспечение заданного коэффициента готовности для малочисленной группы пользователей, готовых заключить с Оператором связи соглашение SLA.

В этом параграфе акцентируется внимание на аспектах резервирования ресурсов транспортной сети в целом – на всех уровнях ее иерархии. При постановке задачи должны рассматриваться аспекты структурной надежности транспортной сети. Другая сторона проблемы – возможность весьма существенных перегрузок в коммутируемой сети. Перегрузки, в свою очередь, целесообразно разделить на два вида. Перегрузки первого вида обусловлены резким ростом полезного трафика. Принципы управления имеющимися ресурсами в подобных ситуациях изложены, например, в [108]. Перегрузки второго вида порождаются ошибками в программном обеспечении и целенаправленными действиями по выводу телекоммуникационной сети из нормального режима работы. Для перегрузок такого рода резервирование транспортных ресурсов не имеет смысла.

Для выбора оптимальных механизмов управления ресурсами транспортной сети необходимо знать принципы их резервирования. Эти принципы каждый Оператор может выбрать с учетом объективных и субъективных факторов. Если упростить задачу, то можно выделить несколько типичных вариантов резервирования ресурсов для каждой линии передачи. Для их иллюстрации используется модель, показанная на рисунке 2.60. Граф исследуемой сети состоит из четырех вершин и пяти ребер. Рассматривается задача резервирования линии передачи b_{13}, связывающая узлы сети a_1 и a_3. С точки зрения теории графов необходимо определить перечень тех ребер b_{ij}, которые используются для резервирования, а также их характеристики.

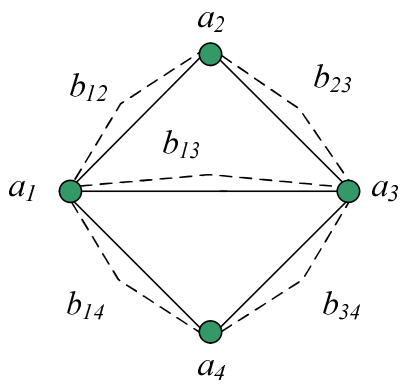


Рисунок 2.60. Принципы резервирования ресурсов транспортной сети

Возможные варианты резервирования ребра b_{13} показаны пунктирными линиями. В графах, состоящих из небольшого количества вершин, легко выделяются все возможные ребра, которые могут быть использованы для решения поставленной задачи. Для графа, служащего моделью крупной сети, процедура перечисления ребер, которые могут быть задействованы в схемах резервирования ресурсов, становится сложной задачей [97].

Следующая проблема заключается в количественной оценке ресурсов, которые будут использованы для резервирования. Оператор сети связи может принять разные решения относительно объема резервных ресурсов. Предположим, что для ребра b_{13} в момент времени t_x требуются транспортные ресурсы, равные $B(t_x)$. Тогда транспортные ресурсы,

которые необходимы для резервирования к этому же моменту времени – $R(t_x)$ можно оценить при помощи коэффициента $k(t_x)$:

$$R(t_x) = k(t_x)\,B(t_x). \qquad (2.45)$$

По всей видимости, в большинстве ситуаций можно использовать коэффициент k, который не зависит от времени. На языке формул это означает, что $k \neq f(t)$. Возможны ситуации, когда справедливы неравенства: $R(t_x) \leq B(t_x)$ и $R(t_x) \geq B(t_x)$. Условие $k = 1$, как правило, характерно для стопроцентного резервирования, чтобы обеспечить заданные показатели качества обслуживания трафика при отказе линии передачи. При $k > 1$ все коммутируемые сети не только на 100% обеспечены резервными транспортными ресурсами, но им доступны и дополнительные тракты, что может оказаться полезным в случаях чрезмерных перегрузок в течение некоторого периода времени. Соответственно, при $k < 1$ качество связи может оказаться ниже нормированного уровня с момента возникновения отказа до его устранения. Глагол "может" использован для того, чтобы подчеркнуть вероятностный характер рассматриваемого процесса.

Для объяснения этого утверждения целесообразно воспользоваться графиком, показанным на рисунке 2.61. Он иллюстрирует использование транспортных ресурсов в течение суток.

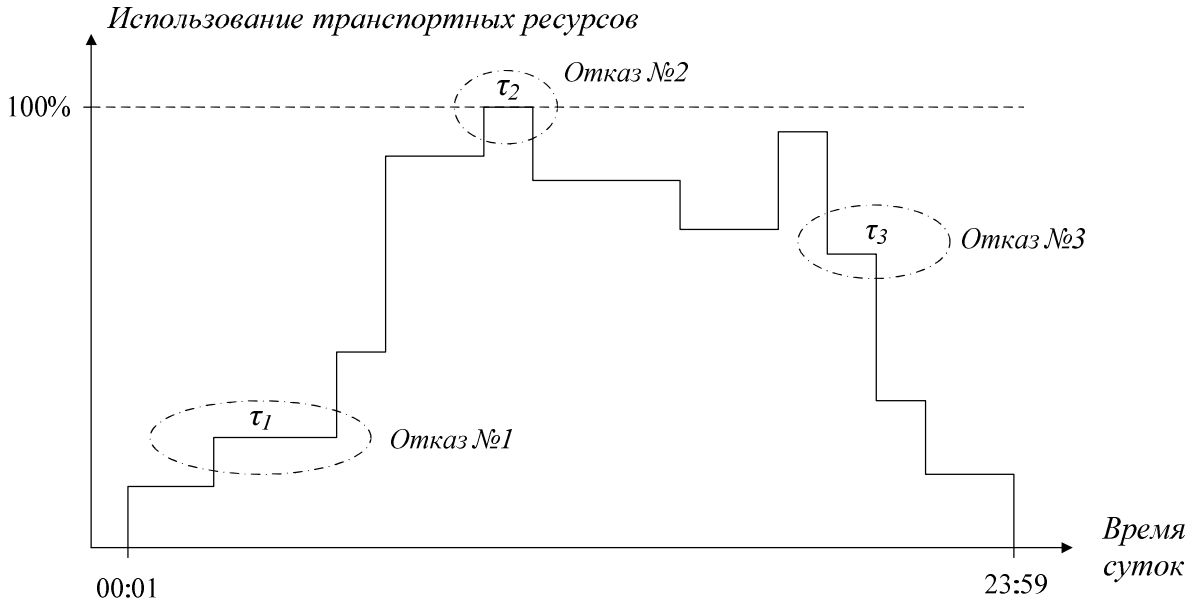


Рисунок 2.61. Вероятностный характер снижения качества обслуживания

Предположим, что все три отказа, которые случились в течение суток, приводят к тому, что ровно половина транспортных ресурсов становится недоступной. Длительность $i-го$ отказа составляет τ_i $(i = \overline{1,3})$. Каждое такое состояние маркировано эллипсом. В течение времени τ_1, когда потребность в транспортных ресурсах находится на уровне, заметно меньшем 50%, ухудшение качества обслуживания не происходит. На отрезке времени τ_2 ситуация будет радикально отличаться. Качество обслуживания становится существенно хуже, чем установлено нормативными документами. Третий отказ занимает промежуточное положение. Безусловно, пользователи будут ощущать ухудшение качества обслуживания в течение периода времени τ_3, но ситуация будет несколько лучше, чем при втором отказе.

Выбор коэффициента k следует осуществлять с учетом экономических показателей функционирования инфокоммуникационной системы в целом. Несомненно, что высокая

конкурентоспособность Оператора связи, подразумевающая его готовность заключать (и выполнять!) соглашения SLA, будет достижима при $k > 1$.

Выбранную величину $R(t_x)$ – для рассматриваемой модели – следует "распределить" по трем альтернативным маршрутам: $b_{12} - b_{23}$, b_{13} и $b_{14} - b_{34}$. Их можно проследить на рисунке 2.60. Каждый из этих маршрутов будет обеспечивать транспортные ресурсы в таком объеме: $R_1(t_x)$, $R_2(t_x)$ и $R_3(t_x)$. Введем весовые коэффициенты ς_1, ς_2 и ς_3, для которых справедливо условие:

$$\varsigma_3 = 1 - (\varsigma_1 + \varsigma_2). \tag{2.46}$$

Тогда можно оперировать следующим рядом: $\varsigma_1 R(t_x)$, $\varsigma_2 R(t_x)$ и $\varsigma_3 R(t_x)$. Для задач, связанных с долгосрочным развитием транспортной сети, целесообразно использовать коэффициенты вида $\varsigma_i(t)$. Формула (2.46) при этом должна оставаться справедливой для любого значения t.

При определении коэффициентов $\varsigma_i(t)$ важным фактором становятся стоимостные показатели транспортных ресурсов в тех направлениях, которые выбраны для создания резервных маршрутов. Предположим, что на одном из таких направлений введен мощный тракт, который пока задействован на $Z(t)\%$. Допустим также, что к моменту ввода этого тракта в эксплуатацию $Z(t) << 100\%$. Вероятно, данный тракт будет использован почти на 100% по истечении времени ΔT. Тогда стоимость транспортных ресурсов объемом $[100 - Z(t)]\%$ на отрезке времени ΔT можно считать величиной, близкой к нулю. Это означает, что для резервирования линий передачи следует, в первую очередь, искать естественный избыток транспортных ресурсов.

...О, были б помыслы чисты,
А остальное все приложится.
(Булат Окуджава)

2.5. Дополнения ко второй главе

2.5.1. Некоторые особенности развития транспортных сетей

Большая и сложная система периодически вступает в фазу эволюции, результаты которой сложно предвидеть. Инфокоммуникационная система – не исключение. Задачу телекоммуникационной сети любого назначения можно рассматривать как один из видов работы, представимой простыми операциями *"взять – перенести"*. В технической литературе на английском языке эта операция известна под названием *"Pick-and-Drop"* [109].

С этой точки зрения то, что нужно "взять", можно рассматривать как тот объем информации, который следует "перенести", соблюдая установленные показатели. Объем информации, в значительной мере, определяет пропускную способность линий передачи в транспортной сети. Для систем обмена данными важным показателем считается среднее время загрузки html-страницы на экране ПК – $t_{стр}^{(1)}$. Оценка этой величины осуществляется очевидным способом, если известны средние значения объема загружаемой информации – $V_{стр}^{(1)}$ и скорости этой операции – $B_{стр}^{(1)}$:

$$t_{стр}^{(1)} = \frac{V_{стр}^{(1)}}{B_{стр}^{(1)}}. \tag{2.47}$$

Повышение величины $V_{стр}^{(1)}$ обусловлено разными причинами, которые порождены процессами двух видов. Процессы первого вида направлены на лучшее восприятие информации. С этой точки зрения они могут считаться полезными для потенциальных абонентов. Процессы второго вида связаны с рекламой или искусственным повышением ве-

личины $V_{cmp}^{(1)}$ для роста доходов некоторых участников инфокоммуникационного рынка. На рисунке 2.3 были приведены прогностические оценки пропускной способности для интерфейса пользователь-сеть. Они основаны на оценках, связанных с "полезными" для пользователей процессами развития инфокоммуникационной системы. Следует также учитывать возможность заметного роста используемой пропускной способности, что объясняется требованиями рекламного характера и искусственного повышения объема загружаемых html-страниц. Тогда оценки, приведенные на рисунке 2.3, могут возрасти в разы (если не на порядок).

Вторая важная особенность развития транспортных сетей заключается в пересмотре ряда устоявшихся положений. Характерный пример такого явления отмечен в [110]. Перспектива телефонии – переход к преобразованию сигналов, расположенных в полосе от 50 до 7000 Гц. Этот диапазон требует от слушающего абонента меньшей концентрации внимания, что значительно снижает усталость. Выше отмечалось, что транспортные ресурсы, предназначенные для услуг телефонной связи, составляют малую часть той пропускной способности, которая необходима для пропускания суммарного трафика. Следовательно, переход с полосы пропускания канала ТЧ на диапазон от 50 до 7000 Гц не вызовет ощутимых изменений в требуемой пропускной способности линий передачи, а повышение качества телефонной связи станет заметным.

Третья особенность развития транспортных сетей напрямую связана с теми нишами, которые занимают беспроводные технологии. Анализ разных проектов, касающихся применения беспроводных технологий, позволяет выявить три основных направления.

Первое направление связано с созданием линий передачи на любом уровне иерархии, когда беспроводные решения экономически выгодны или безальтернативны. Второе направление отражает тенденцию замены проводных технологий в двух компонентах инфокоммуникационной системы вследствие предпочтения пользователей. В первую очередь, этот процесс наблюдается в сетях в помещении пользователей. Характерными примерами можно считать использование беспроводных "мышек" и клавиатур, а также бесшнуровых телефонов разных стандартов. Следующий этап – использование беспроводных технологий в сетях доступа. Пожалуй, самыми характерными примерами этого процесса служат сети связи с подвижными объектами. Пока эти решения в большей мере ориентированы на обслуживание трафика речи. Тем не менее, статистика трафика, который обслуживается Операторами мобильной связи, свидетельствует об увеличении групп абонентов, использующих различные услуги обмена данными и получения видеоинформации. Третье направление применения беспроводных технологий – резервирование ресурсов транспортных сетей.

Четвертая особенность развития транспортных сетей связана с технологиями. Этот термин используется в монографии применительно к разным аспектам функционирования инфокоммуникационной системы. Такой подход не противоречит широкому толкованию слова "технология", приведенному в ряде словарей. Для транспортных сетей этот термин часто используется для описания способов преобразования информации пользователей и последующей передачи. Речь идет, в основном, о тех способах обмена информацией, которые влияют на реализацию технических средств, относящихся к первому и второму уровням модели ISO [40]. Информация об этих технологиях хорошо представлена в ряде публикаций. Полезные сведения можно найти в [40, 42, 74], а также в других работах.

Еще одна специфическая особенность развития транспортных сетей заключается в эволюции того компонента инфокоммуникационной системы, который – строго говоря – не входит в сферу ответственности Оператора связи. Речь идет о сети в помещении пользователя. Некоторые группы пользователей заинтересованы в технологии FTTD – доведении оптического волокна до рабочего стола [111]. Этот процесс стимулирует применение кабелей с ОВ на всех участках доступа. Очевидно, что для решений класса FTTD доступные скорости обмена информацией на интерфейсе пользователь-сеть будут близки к самым оптимистическим прогнозам.

В подобных случаях структуры сетей доступа и в помещениях пользователей будут заметно отличаться от привычных ныне топологий. Структуры транспортных сетей на верхних уровнях иерархии инфокоммуникационной системы меньше подвержены изменениям. В силу ряда причин (скорее административных, чем технических) структуры сетей на этом уровне иерархии соответствуют правилу *"as is"* – как есть. Дело в том, что на уровне сетей дальней связи изменение структуры транспортной сети требует очень больших инвестиций.

2.5.2. Что такое широкополосный доступ?

В этой монографии, как и во многих публикациях по перспективам развития системы электросвязи, часто встречается прилагательное "широкополосный". Оно используется, в основном, применительно к сети доступа и к телекоммуникационным услугам. Возникает естественный вопрос: "Какова минимальная полоса пропускания или скорость передачи, начиная с которой мы корректно используем это определение?". Ответить на данный вопрос не так просто, как может показаться на первый взгляд.

Для начала целесообразно свести поставленный вопрос к доступу. Такой подход можно считать приемлемым, если возможности сети доступа отвечают требованиям, которые порождаются поддерживаемыми услугами. Далее необходимо договориться о той мере, которая будет характеризовать широкополосный доступ. Вероятно, для нижнего уровня модели ISO лучше использовать привычную величину, определяемую количеством битов, переданных в единицу времени. Именно эту величину подразумевает большинство специалистов, когда говорит о широкополосном доступе.

С точки зрения абонента такой способ оценки не всегда можно считать удачным. Действительно, скорость передачи битов в сети доступа может быть внушительной, а получение информации даже небольшого объема потребует чрезмерно много времени. Это значит, что высокую скорость передачи битов следует рассматривать только как необходимое условие для использования определения "широкополосный". Достаточным условием высокую скорость передачи битов считать нельзя. Должны соблюдаться требования по пропускной способности и по производительности всех остальных компонентов, входящих в состав инфокоммуникационной системы. Условия соблюдения этих требований – один из основных вопросов, рассматриваемых в этой монографии.

Вернемся к скорости передачи битов в сети доступа. В первой главе монографии упоминалось, что в публикациях на английском языке часто использовались определения: "wideband" и "broadband". Оба этих слова одинаково переводятся на русский язык – "широкополосный". Европейскими Операторами связи обычно использовались такие градации скорости передачи битов:

- wideband – свыше 64 кбит/с, но меньше 2048 кбит/с;
- broadband – более 2048 кбит/с.

Специалисты из США часто указывали номинал 256 кбит/с в качестве минимальной скорости передачи для широкополосного доступа [116]. Организация экономического сотрудничества и развития придерживается того же мнения [117]. Правда, в конце 2010 года Федеральная комиссия по связи США предложила считать широкополосным такой доступ, при котором пользователь принимает и передает информацию со скоростью 4 Мбит/с и 1 Мбит/с соответственно [117].

По всей видимости, порог, позволяющий считать доступ широкополосным, лучше рассматривать как функцию времени – $B_{min}(t)$. Эту функцию можно считать ступенчатой. Ее изменения определяются алгоритмами, используемыми на верхних уровнях модели ISO. Эти алгоритмы, в свою очередь, порождаются стандартами преобразования сигналов (в первую очередь – относящихся к данным и к видео), а также теми дополнительными аксессуарами, которые сопровождают процессы получения информации.

Целесообразно привести два характерных примера. Первый пример иллюстрирует влияние новых стандартов телевидения. Второй пример касается информации, которую мы получаем, используя всемирную паутину.

Допустим, что удалось найти алгоритм, позволяющий передать телевизионный сигнал со скоростью 64 кбит/с. Тогда даже при наличии трех оконечных устройств в одном домохозяйстве и одного телефона упомянутую выше скорость передачи 256 кбит/с можно считать вполне достаточной (правда, при отсутствии спроса на доступ в Internet). Следовательно, доступ на скорости 256 кбит/с должен быть признан широкополосным.

Теперь рассмотрим процесс получения информации о времени прибытия поезда. Полезные сведения можно сформулировать в виде предложения, которое будет содержать не более двадцати слов. Их можно представить последовательностью из 2000 битов (как максимум). При поиске необходимой информации в Internet будут передаваться не только слова и цифры, а также изображения, а иногда и звуки. В результате объем передаваемых битов возрастает на два порядка и даже более.

Два рассмотренных примера позволяют сделать вывод о сложности определения функции $B_{min}(t)$. Это утверждение справедливо и для задачи прогнозирования поведения этой функции. Целесообразно ограничиться субъективными оценками.

Для периода времени, который предшествовал появлению технологии xDSL, можно считать, что $B_{min}(t) =$ 64 кбит/с. Теперь весьма логичным представляется такое равенство: $B_{min}(t) =$ 2048 кбит/с. Данный номинал можно рассматривать как разумный компромисс между пропускной способностью стандартного тракта E1 и средним значением скорости информационного потока, направляемого в сторону терминала оборудованием ADSL. В ближайшей перспективе в качестве значения функции $B_{min}(t)$, скорее всего, будет фигурировать величина 25 Мбит/с, если для модернизации сетей доступа станут активно использоваться технологии ADSL2+ и различные модификации VDSL.

Альтернативный подход заключается в том, чтобы использовать интервальную оценку функции $B_{min}(t)$. Такой способ определения "широкополосного доступа" сложнее, но позволяет учесть диверсификацию пользователей и особенности технологий, которые применяются Операторами связи.

Завершая этот параграф, следует обратить внимание читателей на укоренившуюся ошибку, касающуюся определения "широкополосный". Используя это слово, мы, строго говоря, должны оперировать мерой, имеющей название "Герц". Вместо этого, в статьях и в монографиях фигурирует единица измерения "бит/с". Тогда было бы правильно называть доступ не широкополосным, а высокоскоростным. Если Вы хотите уяснить соотношение между скоростью передачи битов и полосой пропускания, то следует вспомнить теорему Шеннона и ряд фундаментальных положений теории передачи сигналов [118].

2.5.3. Публикации по тематике второй главы

Количество монографий и журналов, прямо или косвенно относящихся к разным вопросам развития инфокоммуникационных систем, до начала экономического кризиса неуклонно росло. По сравнению со второй половиной XX века объем публикаций (без учета ресурсов Internet) увеличился, вероятно, на порядок. К сожалению, подтвердился один из законов Паркинсона: "Прогресс науки обратно пропорционален числу выходящих журналов".

Большинство публикаций связано с поверхностным анализом тенденций развития инфокоммуникационной системы, описанием технических особенностей ряда новейших технологий, обсуждением опыта эксплуатации современных сетей электросвязи, скрытой и явной рекламой. Доля тех публикаций, которые отвечают критерию *"новые научные результаты"*, по "гамбургскому счету" стала пугающе низкой. Для подтверждения этой сентенции достаточно перелистать отраслевые журналы семидесятых или восьмидесятых годов и сравнить напечатанные в них статьи с публикациями последних лет.

Правда, в последние годы стали появляться серьезные публикации, из которых можно сделать вывод о постепенном возрождении интереса к научным исследованиям. Примерами таких работ можно считать [7, 8, 33, 44, 108, 112 – 115]. Эти источники будут полезны специалистам, которые решают задачи оптимального построения транспортных сетей.

Появление серьезных публикаций по планированию инфокоммуникационных сетей сдерживается еще одним фактором. Методику планирования инфокоммуникационной сети в целом или ее фрагментов целесообразно довести до программного продукта. В результате разработчик создает тиражируемый товар, обладающий реальной стоимостью в отличие от набора алгоритмов и формул. Пользователю принципы планирования сетей, как правило, известны в самых общих чертах. Эффективность предлагаемых решений оценить сложно. Большинство разработчиков программных продуктов такое положение вещей вполне устраивает. Проектировщики также заинтересованы в приобретении подобных средств, так как наличие пусть даже неоптимальной методики лучше, чем ее отсутствие.

Некоторые интересные публикации не попали в список использованных источников, так как напрямую не использовались при составлении текста второй главы монографии. Ряд полезных, на мой взгляд, статей, докладов и монографий приведен в "Перечне дополнительной литературы к Главе 2".

Литература к Главе 2

Использованные источники

1. В.В. Глущенко. Прогнозирование. – М.: Вузовская книга, 2000.
2. В.Н. Волкова, А.А. Денисов. Основы теории систем и системного анализа. – СПб.: издательство СПбГТУ, 1999.
3. H.A. Linstone. The Delphi Method. Techniques and Application. – New Jersey Institute of Technology, 2002.
4. M. Crawford, D. Verheye. Residential Service Aggregation in the Second Mile. – Alcatel Telecommunications Review, 2nd Quarter 2003.
5. А.М. Горнак. Особенности архитектуры фиксированного широкополосного доступа. – Технологии и средства связи, №4, 2006.
6. Е.М. Четыркин. Статистические методы прогнозирования. – М.: Статистика, 1975.
7. Л.Е. Варакин. Распределение доходов, технологий и услуг. – М.: МАС, 2002.
8. Р. Кох, Г. Яновский. Эволюция и конвергенция в электросвязи. – М.: Радио и связь, 2001.
9. Н.А. Соколов. Телекоммуникационные сети. – М.: Альварес Паблишинг, 2004.
10. М.А. Шнепс-Шнеппе. SLA: гарант прав потребителей. – Connect! Мир связи, №7, 2003.
11. О.И. Фаерберг, В.О. Шварцман. Качество услуг связи. – М.: ИРИАС, 2005.
12. M. Hopkins, G. Louth, H. Bailey, R. Yellon, A. Ajibutu, M. Miva. A Multi-Faceted Approach to the Forecasting Broadband Demand and Traffic. – IEEE Communications Magazine, February 1995.
13. N. Sokolov. Traffic Forecasting for the Digital Overlay Networks. – Proceedings of International Conference "Distributed Computer Communication Networks. Theory and Application", Tel-Aviv (Israel), 1997.
14. Ф. Юнг. Перспективы развития инфокоммуникаций. – СПб.: "Петеркон", 2003.
15. В.В. Ноздрин. Состояние и прогноз развития широкополосных местных сетей связи. – Мобильные системы, №7, 2004.
16. Б.В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. Математические методы в теории надежности. – М.: Москва, Наука, 1965.
17. В.А. Острейковский. Теория надежности. – М.: Высшая школа, 2003.
18. С. Браднер. Так сколько же девяток нужно? – Сети (Computerworld), №34, 1998.

19. C.R. Johnson, Y. Kogan, Y. Levy, F. Saheban, P. Tarapore. VoIP Reliability: A Service Provider's Perspective. – IEEE Communications Magazine, July 2004.
20. W. Taren. Who’s got the edge? – Telephony/July 10, 1995.
21. Г.Б. Давыдов, В.Н. Рогинский, А.Я. Толчан. Сети электросвязи. – М.: Связь, 1977.
22. ISO Standards Compendium "ISO 9000 Quality Management, Sixth Edition", 1996.
23. M.J. Robinson, T.S. Werner, J.A. Ward. Solving the Access Outage Problem. – AT&T Technology, Vol. 9, №3, 1994.
24. T. Miki. Towards the Service-Rich Era. – IEEE Communications Magazine, February 1994.
25. Н.А. Соколов. Сети абонентского доступа. Принципы построения. – Пермь: "Энтер-профи", 1999.
26. P. Meade. The year of ADSL: Business, consumers want faster connections. – America’s Network, February 1, 1997.
27. ITU-D. New Technologies for Rural Applications. – Final Report of ITU-D Focus Group 7, 2000.
28. Н.А. Соколов. Семь аспектов развития сетей доступа. – Технологии и средства связи. Специальный выпуск "Системы абонентского доступа", 2005.
29. http://www.dslforum.org.
30. http://www.xdsl.ru.
31. Д. Аллен. Активное наступление пассивных оптических сетей. – Журнал сетевых решений LAN, №1, 2001.
32. С. Орлов. Будущее PON становится определеннее. – Журнал сетевых решений LAN, август 2004.
33. И.Г. Бакланов. SDH → NGSDH: Практический взгляд на развитие транспортных сетей. – М.: Метротек, 2006.
34. CCITT. Manual "Local Network Planning". – ITU, Geneva, 1979.
35. В. Олифер. Как устроена сеть SDH. – Журнал сетевых решений LAN, май 2002.
36. S. Hawley. Access networks for triple-play services. – TelephonyOnline.com, November 15, 2002.
37. И.М. Жданов, Е.И. Кучерявый. Построение городских телефонных сетей. – М.: Связь, 1972.
38. N. Sokolov, A. Alter. Broadband Wireless Access and Communications Reliability Provision. – Proceedings of the Moscow International Conference "Broadband Russia & CIS Summit", Moscow, 2004.
39. ITU-T. Information technology – Open Systems Interconnection – Basic reference model: The basic model common text with ISO/IEC. Recommendation X.200. – Geneva, 1994.
40. И.Г. Олифер, Н.А. Олифер. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. 2-е издание. – СПб.: издательство "Питер", 2003.
41. Ю.А. Парфенов. Кабели электросвязи. – М.: Эко-Трендз, 2003.
42. Н.Н. Слепов. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. – М.: Радио и связь, 2000.
43. А.В. Шмалько. Цифровые сети связи: основы планирования и построения. – М.: Эко-Трендз, 2001.
44. А.В. Крендзель. Планирование перспективных сетей доступа. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, СПб.: ГУТ, 2001.
45. Н. Кристофидес. Теория графов: Алгоритмический подход. – М.: Мир, 1978.
46. Ф. Харари. Теория графов. – М.: Эдиториал УРСС, 2003.
47. В.А. Долодаренко, В.М. Мамчук. Один локальный метод решения задачи *n* коммивояжеров большой размерности. – "Доклады АН УССР", №1, 1986.
48. M.R. Rao. A note on the multiple travelling salesman problem. – Operation Research, № 3, part 1, 1980.

49. Н.Н. Моисеев. Ю.П. Иванилов, Е.Н. Столярова. Методы оптимизации. – М.: Наука, 1978.
50. А.В. Аттетков, С.В. Галкин, В.С. Зарубин. Методы оптимизации. – М.: издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001.
51. Л.С. Гурин, Я.С. Дымарский, А.Д. Меркулов. Задачи и методы оптимального распределения ресурсов. – М.: Советское Радио, 1968.
52. Б.Н. Иванов. Дискретная математика. Алгоритмы и программы. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001.
53. В.А. Фролькис. Введение в теорию и методы оптимизации для экономистов. – М.: 2002.
54. М.В. Пинегина. Математические методы и модели в экономике. – М.: Экзамен, 2002.
55. А.Т. Абдыкалыков, Л.А. Кокурин, В.Ю. Лузин, М.В. Носов, А.С. Романов, Ю.В. Седельников, Б.П. Филин. Расчет надежности автоматизированной системы Московской областной ОСОДУ. – "Электросвязь", №4, 2004.
56. В.А. Григорьев, О.И. Лагутенко, Ю.А. Распаев. Сети и системы радиодоступа. – М.: Эко-Трендз, 2005.
57. О. Ибе. Сети и удаленный доступ. – М.: ДМК Пресс, 2002.
58. А.И. Витченко, Н.А. Соколов. Оценка экономической эффективности мультисервисных абонентских концентраторов. – Вестник связи, №10, 2004.
59. Л.В. Комиссарук, О.А. Дьякова. Концентратор абонентского доступа или удаленный коммутатор? – Вестник связи, №11, 2004.
60. В.Б. Булгак, Л.Е. Варакин, Ю.К. Ивашкевич, В.Д. Москвитин, В.Г. Осипов. Концепция развития связи Российской Федерации. – М.: Радио и связь, 1995.
61. В.К. Федюкин. Управление качеством процессов. – СПб.: Питер, 2004.
62. Н.А. Соколов. Сети доступа в начале XXI века. – Сборник трудов второй всероссийской конференции "Абонентский доступ в сетях следующего поколения", СПб.: 2005.
63. П. Дженстер, Д. Хасси. Анализ сильных и слабых сторон компании. Определение стратегических возможностей. – М.: издательский дом "Вильямс", 2003.
64. Ф. Котлер. Маркетинг-менеджмент. – СПб.: издательский дом "Питер", 2005.
65. Дж. Кендалл М, А. Стьюарт. Теория распределений. – М.: Наука, 1966.
66. Г. Деч. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. – М.: Наука, 1971.
67. Р.Н. Вадзинский. Справочник по вероятностным распределениям. – СПб.: Наука, 2001.
68. И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.: Наука, 1986.
69. Х.А. Таха. Введение в исследование операций. – М.: издательский дом "Вильямс", 2001.
70. А.В. Антонов. Системный анализ – М.: Высшая школа, 2006.
71. Л.Н. Иванов, А.Л. Иванов. Методы принятия решений бизнес-плана. Эвристика. – М.: "Приор-издат", 2004.
72. Г. Альтшуллер, Ч. Гаджиев, Ч. Фликштейн. Введение в вепольный анализ. – Баку, ОЛМИ, 1973.
73. В. Петров, Э. Злотина. Структурный вещественно-полевой анализ. – Тель-Авив, 2002 (книга размещена в Internet: http://www.trizland.ru/trizba.php?id=111).
74. А.М. Меккель. Оптическая транспортная сеть и NGN. – Lighwave Russian Edition, №2, 2006.
75. Дж. Поллард. Справочник по вычислительным методам статистики. – М.: Финансы и статистика, 1982.
76. Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. Таблицы математической статистики. – М.: Наука, 1983.

77. Н.А. Соколов, С.А. Дмитриева. Структурные характеристики сельских телефонных сетей. Сборник научных трудов ЦНИИС "Сети с интеграцией служб", 1990.
78. Н.А. Соколов, А.В. Крендзель. Сети абонентского доступа: структурные характеристики. – Электросвязь, 1997, №11.
79. Н.А. Соколов. Технологии коммутации в сетях следующего поколения. – Инфоком. Труды МАС, 2004, №3.
80. Проект "21CN": оценка его участников и будущих партнеров (по материалам журналов Global Telecom Business и Vanillia Plus). – Век качества №2, 2006.
81. P. Darling. Telstra's "Next Generation Network" – Telecommunications Journal of Australia, Vol. 56, No 1, 2006.
82. K. Wieland. Goodbye PSTN, hello 21CN. – Telecommunications International, November, 2006.
83. С.И. Шелобаев. Экономико-математические методы и модели. Второе издание. – М.: Юнити-Дана, 2005.
84. П. Фишберн. Теория полезности для принятия решений. – М.: Наука, 1978.
85. Исследование операций: в 2-х томах. Перевод с английского под редакцией Дж. Моудера, С. Элмаграби. – М.: Мир, 1981.
86. Reviewing C&W Guernsey's Wholesale Leased Line Prices (Consultation Paper) – Office of Utility Regulation, 2007.
87. Я.С. Дымарский. Задачи и методы оптимизации сетей связи. – СПб.: издательство СПбГУТ, 2005.
88. ITU-T. Network performance objectives for IP-based services. Recommendation Y.1541. – Geneva, 2006.
89. Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. Прикладные задачи теории вероятностей. – М.: Радио и связь, 1983.
90. ITU-T. The E-model, a computational model for use in transmission planning. Recommendation G.107. – Geneva, 1998.
91. Г.В. Вемян. Передача речи по сетям электросвязи. – М.: Радио и связь, 1985.
92. Б.С. Лившиц, Я.В. Фидлин, А.Д. Харкевич. Теория телефонных и телеграфных сообщений. – М.: Связь, 1971.
93. Ю.Н. Корнышев, А.П. Пшеничников, А.Д. Харкевич. Теория телетрафика. – М.: Радио и Связь, 1996.
94. Н.А. Соколов, Р.Д. Рерле. Управление емкостью пучка в цифровых кроссовых узлах. – Труды четвертого международного семинара по теории телетрафика и компьютерному моделированию (МСТТКМ-4), Москва, 1992.
95. Теория сетей связи: Учебник для вузов связи / В.Н Рогинский, А.Д. Харкевич, М.А. Шнепс и др.; под ред. В.Н. Рогинского. – М.: Радио и Связь, 1981.
96. В.И. Нейман. Структуры систем распределения информации. – М.: Радио и связь, 1983.
97. В.К. Попков. Математические модели связности. – Новосибирск, издательство ИВМиМГ СО РАН, 2006.
98. T. Jensen. Network Planning – Introductory Issues. – Telektronikk, No. 3/4, 2003.
99. В.И. Котов. Анализ рисков инвестиционных проектов на основе функций чувствительности и теории нечетких множеств. – СПб.: Судостроение, 2007.
100. В.Д. Москвитин. Построение и функционирование сетей верхнего уровня ЕСЭ РФ в условиях многооператорской среды. – Инфоком. Труды МАС, 2005, №1.
101. J.M. Simmons. Network Design in Realistic "All-Optical" Backbone Networks. – IEEE Communications Magazine, November 2006.
102. Е. Евдокимов, М. Суханова. Германия и Британия переходят на VoIP. – Сетевой журнал, №7-8, 2004.
103. L. Newell. Introduction "The Changing Landscape of Data Services". – Alcatel Telecommunications Review, 4th Quarter 2004.

104. С. Харди. Конференция FTTH показала прогресс в использовании технологии. – Lightwave, Russian Edition, No 1, 2007.
105. K. Wieland. Digging deep for a competitive edge. – Telecommunications, October, 2007.
106. J. Barthold. U.S. telcos bet on video quality. – Telecommunications International, August 2007.
107. С.В. Журавлев. Опыт перехода сетей связи на пакетные технологии. – Вестник связи, №12, 2007.
108. Г.Г. Яновский, Н.П. Крутякова, Я.С. Дымарский. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи. – М.: Мобильные коммуникации, 2003.
109. J. Rekimoto. Pick-and-drop: a direct manipulation technique for multiple compute environments. – Proceedings of the 10th annual ACM symposium of User interface software and technology, 1997.
110. В.И. Нейман, Д.А. Селезнев. Интернет-телефония и перспективы ее развития. – Электросвязь, №1, 2008.
111. Б. Баллард. Оптика до рабочего стола. – Журнал сетевых решений LAN, №3, 2008.
112. Л.Е. Варакин. Инфокоммуникации будущего. – Электросвязь, №11, 2003.
113. Л.Е. Варакин. Логистический закон развития с переменными параметрами. – Инфоком. Труды МАС, №1, 2005.
114. В.М. Вишневский. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003.
115. В.М. Вишневский, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. – М.: Техносфера, 2005.
116. С. Орлов. Доступ становится шире. – Журнал сетевых решений LAN, Ноябрь 2004.
117. С.А. Попов. ШПД – контрольный показатель развития информационного общества. – Вестник связи, №5, 2011.
118. А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, М.В. Назаров, Л.М. Финк. Теория передачи сигналов. – М.: Радио и связь, 1988.

Перечень дополнительной литературы к Главе 2

- Е.В. Мархай. Основы технико-экономического проектирования городских телефонных сетей. – М.: Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио, 1953.
- А.А. Харкевич. Очерки общей теории связи. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955.
- Л.С. Левин, М.А Плоткин. Цифровые системы передачи информации. – М.: Радио и связь, 1982.
- Городская телефонная связь: Справочник / Б.З. Берлин, А.С. Брискер, Л.С. Васильева и др.; под ред. А.С. Брискера и К.П. Мельникова. – М.: Радио и связи, 1987.
- Сельская телефонная связь: Справочник / Ю.А. Алексеев, В.А. Бирюков, А.С. Брискер и др.; под ред. К.П. Мельникова и Ю.А. Парфенова. – М.: Радио и связи, 1987.
- Р. Бесслер, А. Дойч. Проектирование сетей связи. – М.: Радио и связь, 1988.
- М.Е. Смолянский. Проектирование линейных сооружений ГТС. – М.: Радио и связь, 1989.
- Е.П. Дубровский. Канализационно-кабельные сооружения связи. – М.: Высшая школа, 1991.
- И.И. Гроднев, С.М. Верник, Л.Н. Кочановский. Линии связи. – М.: Радио и связь, 1995.

- Основные положения развития Взаимоувязанной сети связи Российской Федерации на перспективу до 2005 года. Книга 2 " Основные положения развития первичной сети общего пользования". – М.: Государственная комиссия по электросвязи при Министерстве связи Российской Федерации, 1996.
- И Глебов. Новый товар – "темные волокна". – Технологии и средства связи, №2, 2000.
- Перспективные телекоммуникационные технологии. Потенциальные возможности. Под редакцией Л.Д. Реймана, Л.Е. Варакина. – М.: МАС, 2001.
- С. Мак-Квери, К. Мак-Грю, С. Фой. Передача голосовых данных по сетям Cisco Frame Relay, ATM и IP. – М.: издательский дом "Вильямс", 2002.
- Н.Л. Бирюков, В.К. Стеклов. Транспортные сети и системы электросвязи. Системы мультиплексирования. – Киев, издательский Дом "ИНФРА-М", 2003.
- А.М. Меккель. Перспективы развития магистральных транспортных сетей. – Информ Курьер Связь, №6, 2005.
- А.М. Горнак. Услуги, технологии и стандарты городских сетей класса Ethernet. – Документальная электросвязь, январь 2005.
- Л. Даанс, В. Масколо, М. Фонтана. Конвергентные транспортные сети. – Технологии и средства связи, №1, 2005.
- В.Е. Власов, Ю.А.Парфенов Кабели цифровых сетей электросвязи. – М.: Эко-Трендз, 2005.
- С.С. Коган. Мультисервисная транспортная платформа для сетей следующего поколения. – Фотон-Экспресс, №1, 2006.
- Д. Джонатан, Д.П.М. Бхатия, С. Калидинди, С. Мукхержи. Основы передачи голосовых данных по сетям IP. – М.: издательский дом "Вильямс", 2007.
- А. Филимонов. Построение мультисервисных сетей Ethernet. – СПб.: БХВ, 2007.
- Н. Рэндалл, Б. Сосински. Беспроводные решения. – М.: Техносфера, 2007.
- А.М. Горнак. Сценарии развития транспортной инфраструктуры оператора. – Connect! Мир связи, №4, 2008.
- В.А. Ефимушкин, И.М. Савандюков. Планирование ресурсов в сетях WDM. – Электросвязь, №1, 2008.
- Е.Б. Алексеев, В.Н. Гордиенко, В.В. Крухмалев, А.Д. Моченов, М.С. Тверецкий. Проектирование и техническая эксплуатация цифровых телекоммуникационных систем и сетей. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008.
- В.К. Попков. Математические модели живучести сетей связи. – Изд. СО АН СССР, Новосибирск, 1990.
- О.К. Скляров. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы. – М.: СОЛОН-Р, 2001.
- Р.Р. Убайдуллаев. Волоконно-оптические сети. – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 1998.
- А.И. Овсянников, В.А. Колесников, М.К. Цыбулин. Основы проектирования сооружений связи: Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1991.
- Ю.В. Семенов. Проектирование сетей связи следующего поколения. – СПб.: Наука и техника, 2005.
- И.Н. Корнеев, С.Г. Фень. Сетевые структуры телекоммуникационной индустрии. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005.
- Ю.Ф. Кожанов. Интерфейсы и протоколы сетей следующего поколения. – СПб.: Альфарет, 2006.
- П.А. Барабаш, С.П. Воробьев, В.И. Курносов, Б.Я. Советов. Инфокоммуникационные технологии в глобальной информационной инфраструктуре. – СПб.: Наука, 2008, 552 с.
- Д.М. Ненадович. Методологические аспекты экспертизы телекоммуникационных проектов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008.

- Т.А. Кузовкова, Л.С. Тимошенко. Анализ и прогнозирование развития телекоммуникаций. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009.
- А. Атцик, А. Гольдштейн. Эволюция транспортных технологий. – Connect! Мир связи, №11, 2009.
- В.А. Нетес. Ethernet операторского класса. Вестник связи, №10, № 11, 2010.
- M. Feneyrol. Telecommunication in the 21st Century: The Real and the Virtual. – Springer, London, 1997.
- R. Horak. Communications systems and networks. – M&T Books, New York, 1997.
- F. Cairncross. The Death of Distance. – Harvard Business School Publishing, 1997.
- Telecommunications Optimization: Heuristic and Adaptive Techniques. Edited by D.V. Corne, M.J. Oates, G.D. Smith. – John Wiley & Sons, Ltd, 2000.
- P.E. Green. Fiber to the Home: the New Empowerment. – Wiley-Interscience, 2005.
- R.M. Roberts. Networking Fundamentals. – The Goodheart-Willcox Company Inc., Illinois, 2005.
- В. Комашинский, Н. Соколов Концепция 2Э: новый подход к модернизации системы сельской связи. – Connect! Мир связи, №9, 2011.

Я знаю только то, что ничего не знаю.
(Сократ)

3. Методы расчета коммутируемых сетей

Ничто не может быть красиво со всех точек зрения.
(Гораций)

3.1. Особенности планирования коммутируемых сетей

Классическим руководством по планированию коммутируемой сети можно считать набор методик, разработанных в период массового внедрения координатных АТС. Эти методики стали результатом совместной работы научных центров, предприятий, которые разрабатывали коммутационные станции, а также проектных институтов. Научной базой для планирования ТФОП, развиваемой на основе координатной коммутационной техники, стали результаты, которые были получены коллективом специалистов под руководством профессора Б.С. Лившица.

Квазиэлектронные и цифровые АТС внедрялись в местные телефонные сети почти одновременно. Подробные методики планирования для нового этапа развития российской ТФОП не были созданы. Проектировщики руководствовались тем опытом, который был получен в процессе работы с методиками, предназначенными для координатной техники. Подобная практика проектирования не могла гарантировать нахождение оптимальных решений, так как была основана, в значительной мере, на интуиции разработчика.

Тем не менее, координатные, квазиэлектронные и цифровые АТС объединяет общая технология распределения информации – коммутация каналов. Этот факт определяет ряд универсальных принципов модернизации телефонной сети. Для сетей ССП, которые базируются на технологии "коммутация пакетов", применение методов планирования, разработанных для ТФОП, может стать источником заведомо неэффективных решений.

Актуальность разработки научно-обоснованной методики планирования сетей ССП представляется очевидной. Данное утверждение базируется на положении, принятом без должного (для решений подобного масштаба) технико-экономического обоснования: все коммутируемые сети будут интегрироваться на основе идеологии ССП. В зарубежной технической литературе этот процесс чаще называют конвергенцией. Правда, если взять определение конвергентных услуг (converged services) из рекомендации МСЭ Q.1702 (The **integration** of Internet, multimedia, e-mail, presence, instant messaging, m-commerce, etc., services with voice service), то становится ясно, что речь идет именно об интеграционных процессах. Кстати, слово "integration" набрано жирным шрифтом и подчеркнуто в тексте рекомендации МСЭ.

Коль скоро речь идет об интеграции коммутируемых сетей, название третьей главы и раздела 3.1 следовало бы изменить. Очевидно, что слова "коммутируемые сети" в обоих случаях должны фигурировать в единственном числе. Тем не менее, на выбор названий главы и раздела повлияли два фактора. Во-первых, практическая реализация сети ССП может пойти по иному пути, отличающемуся от принятых ранее постулатов. Во-вторых, ряд разрабатываемых методов расчета может оказаться вполне пригодным для сетей, построенных в соответствии с концепцией, которая заимствуют лишь часть положений из идеологии ССП. К этому вопросу мы вернемся в конце раздела после того, как будут сформулированы три характерные особенности планирования коммутируемых сетей.

Первую важную особенность планирования коммутируемых сетей можно выявить в результате сравнения со строительством зданий. Такой подход уже был использован в разделе 2.1, где в качестве аналога транспортной сети рассматривался фундамент здания. Один и тот же фундамент может быть использован при строительстве разных – по своему функциональному назначению – зданий. Предположим, что было решено построить промышленное предприятие. В процессе реализации проекта выяснилось, его в данном месте нецелесообразно создавать производственные площадки. Иногда на имеющемся фундаменте можно построить высотный жилой дом. Если изменение проекта начинается сразу

после строительства фундамента, то дополнительные затраты будут, как правило, минимальны. Если практически почти все работы строительные завершены, то затраты застройщика будут максимальны.

Этот простой пример позволяет сформулировать первую особенность планирования коммутируемых сетей. Точность прогнозирования становится более важным фактором, чем при планировании транспортной сети. Аспекты прогнозирования для коммутируемых сетей изложены во втором разделе.

Вторая важная особенность планирования коммутируемых сетей обусловлена тем, что Оператору связи приходится рассматривать внушительный набор сценариев развития инфокоммуникационной системы. Выбор сценария – ответственное решение, которое сопряжено с риском финансового и технического характера. Основным аспектам выбора сценариев, направленных на модернизацию коммутируемых сетей, посвящен третий раздел.

Третья существенная особенность планирования коммутируемых сетей обусловлена идеологией ССП. Математические модели, формализующие процессы функционирования средств распределения информации, представляют собой сложные СМО и СеМО. Их исследование требует разработки новых методов расчета, что стимулирует дальнейшее развитие теории телетрафика. Четвертый раздел данной главы содержит методику расчета коммутируемых сетей.

Теперь можно вернуться к концепции, реализация которой основана на частичном использовании идей ССП. В [1] был введен термин "консолидация", который полезен при анализе разных вариантов разумного использования общих аппаратно-программных средств и линейно-кабельных сооружений. На рисунке 3.1 приведена модель, при помощи которой можно объяснить суть процесса консолидации. Модель иллюстрирует результат развития K сетей с учетом формирования ССП. Ряд сетей может войти в ССП только частично. Предполагается, что численность таких сетей равна L. Очевидно, что $L \le K$.

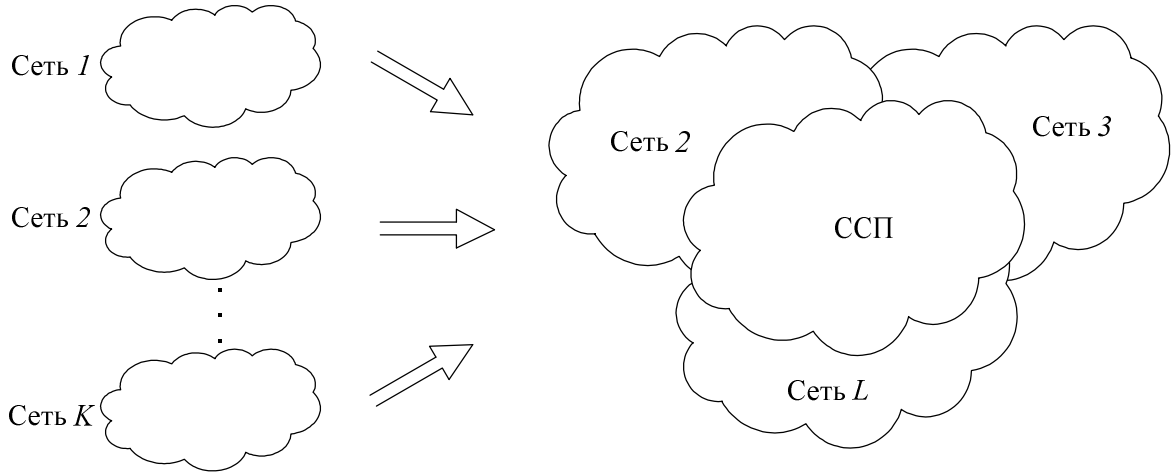
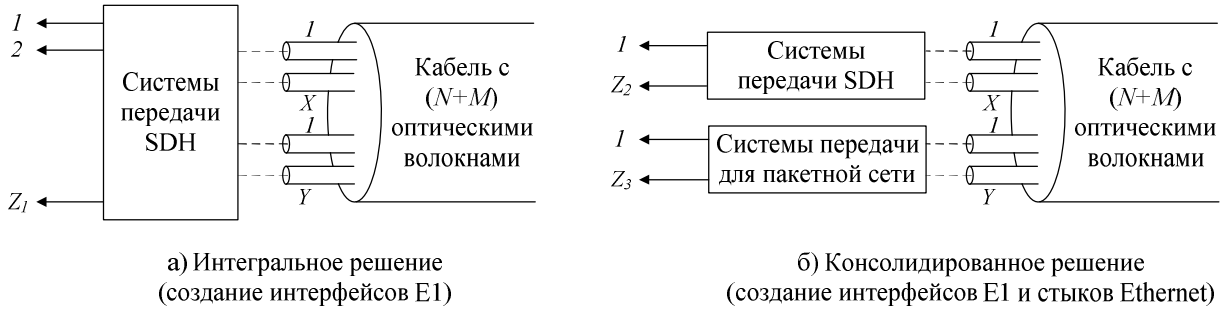


Рисунок 3.1. Развитие совокупности телекоммуникационных сетей

Наречие "частично" в предыдущем абзаце напрямую связано с консолидацией. Хорошо известно, что теоретически интеграция сетей позволяет получить существенный экономический эффект [2, 3]. С другой стороны, многим интеграционным процессам свойственны высокие риски. Основное отличие консолидации от интеграции можно сформулировать в виде такого девиза: "Пожертвовать частью доходов, но снизить уровень риска". Идею консолидации можно рассматривать как "хорошо забытое старое". Это подтверждается анализом текстов, в которых обсуждалась идея академика А.А. Харкевича о построении единой автоматизированной сети связи (ЕАСС). В публикациях, которые посвящены аспектам создания ЕАСС, термин "консолидация" не фигурировал. Тем не менее, суть идеологии ЕАСС можно рассматривать как разумное сочетание процессов интеграции и консолидации.

Применительно к рассматриваемой модели реализация предложенного девиза будет заключаться в поиске эффективных путей развития сетей под номерами $2, 3, \ldots, L$. По всей видимости, эти сети окончательно не вольются в состав ССП, но могут использовать ее ресурсы и функциональные возможности. Простейший пример процесса консолидации – организация транспортных ресурсов для сетей с разными технологиями коммутации. На рисунке 3.2. показаны два варианта решений задачи такого рода. В левой части рисунка представлен вариант построения линии передачи для транспортной сети, основанный на интеграции. Решение той же задачи, базирующееся на консолидации, изображено справа.



а) Интегральное решение (создание интерфейсов E1)

б) Консолидированное решение (создание интерфейсов E1 и стыков Ethernet)

Рисунок 3.2. Два варианта построения линии передачи в транспортной сети

Интегральное решение основано на том, что в кабеле все оптические волокна уплотняются при помощи систем передачи синхронной иерархии. В результате создаются транспортные ресурсы, объем которых оценивается, например, количеством трактов E1 с пропускной способностью 2048 кбит/с. Оно обозначено как Z_1. Можно утверждать, что удельная стоимость транспортных ресурсов C_1 будет минимальна по сравнению с любым другим вариантом организации сети, который также ориентирован только на создание трактов E1.

При выборе консолидированного решения учитывается тот факт, что часть ресурсов транспортной сети в перспективе должна поддерживать стык Ethernet. Тогда системы передачи синхронной иерархии используются для уплотнения X оптических волокон. В системы передачи, которые ориентированы на пакетные сети, включаются Y оптических волокон. Удельная стоимость транспортных ресурсов, объем которых (в количестве трактов E1) определяется величиной Z_2, равно C_2. Очевидно, что $C_2 > C_1$. Данный недостаток компенсируется снижением риска, обусловленного тем, что для реализации стыков Ethernet (их количество равно Z_3) потребуются дополнительные инвестиции.

Консолидация, в рассматриваемом примере, подразумевает использование одного кабеля с оптическими волокнами, которые уплотняются системами передачи с разной технологией переноса информации. Интересные примеры консолидации можно найти при анализе сценариев модернизации систем ведомственной связи, процессов эволюции аутсорсинга [4] и принципов построения средств поддержки услуг – последний элемент модели МСЭ, которая была приведена на рисунке 1.32.

Системные решения, основанные на процессах консолидации, используются в ряде сценариев перехода к ССП. В частности, некоторые Операторы располагают современной сетью телефонной связи, отвечающей всем требованиям имеющихся и потенциальных пользователей. В подобной ситуации целесообразно продолжить эксплуатацию средств коммутации каналов. Вместе с тем, модернизация транспортной сети для поддержки услуг по обмену данными и передачи видеоинформации должна осуществляться с учетом предстоящего перехода к обслуживанию трафика речи в соответствии с идеологией ССП.

Очевидно, что для коммутируемых сетей, развитие которых предполагается в русле процессов консолидации, целесообразно разработать единые методы расчета. Эти методы не обязательно должны стать универсальными, но в них следует учесть те особенности сетей, которые порождаются процессами консолидации.

Математика – самая надежная форма пророчества.
(В. Швебель)

3.2. Прогнозирование характеристик коммутируемых сетей

3.2.1. Исследуемые процессы и постановка задачи

Процессы модернизации коммутируемых сетей можно рассматривать с разных точек зрения: технической, экономической, организационной и других. В монографии основное внимание уделяется техническим аспектам развития транспортных и коммутируемых сетей. Более того, из технических характеристик обоих видов сетей выделяются те, которые интересны для решения задач планирования. Например, проблемы технической эксплуатации, которые, вне всякого сомнения, весьма актуальны для перспективной инфокоммуникационной системы, практически не затрагиваются.

Большинство технических характеристик коммутируемых сетей, представляющих интерес с точки зрения задач планирования, меняется со временем. Следовательно, для разработки сценариев развития инфокоммуникационной системы и их анализа нужны прогнозы. Для планирования коммутируемых сетей необходимы такие оценки:

- количество обслуживаемых пользователей в момент времени t – $N(t)$;
- параметры трафика в момент времени t, которые можно представить некой функцией $F_1(t, x_1, x_2, \dots, x_k)$;
- показатели качества обслуживания к моменту времени t, заданные функцией $F_2(t, y_1, y_2, \dots, y_l)$.

Переменные x_i описывают те параметры трафика, которые необходимы для расчета производительности узлов коммутации. Для ТФОП, при известном значении $N(t)$, надо знать количество вызовов от одного пользователя – $C(t)$ и среднюю длительность одного соединения – $T(t)$. Для трафика, который отличен от речевого, как правило, необходимы прогнозы и ряда других переменных. К этим вопросам мы еще вернемся. Переменные y_i относятся к параметрам качества обслуживания, нормируемым к моменту времени t.

Расслоение требований пользователей к инфокоммуникационной системе привело к тому, что величину $N(t)$, а также функции $F_1(t, x_1, x_2, \dots, x_k)$ и $F_2(t, y_1, y_2, \dots, y_l)$ следует задавать для G характерных групп. Причем величина G, строго говоря, будет функцией времени, принимающей только целочисленные положительные значения при изменении аргумента t. В качестве величины G целесообразно выбрать ее максимальное значение. Тогда некоторые слагаемые в исследуемых функциях будут автоматически обращаться в ноль. Очевидно, при разделении совокупности обслуживаемых пользователей на G групп справедливо следующее равенство:

$$N(t) = \sum_{j=1}^{G} N_j(t). \tag{3.1}$$

Слагаемое $N_j(t)$ определяет количество пользователей в $j-ой$ группе к моменту времени t. Для пользователей $j-ой$ группы ($j = \overline{1, G}$) следует определить две функции: $F_1(t, x_1, x_2, \dots, x_k)$ и $F_2(t, y_1, y_2, \dots, y_l)$. Для этих функций соотношения вида (3.1) не будут корректными.

Расслоение требований пользователей приводит к неидентичным последствиям для услуг разных видов. Например, для телефонии ожидается повышение доли абонентов, которые будут пользоваться услугами передачи речи в полосе от 50 до 7000 Гц [5]. Это не приводит к существенному росту необходимых транспортных ресурсов. Иная ситуация складывается с услугами по обмену данными. Различие в номиналах скоростей передачи,

оцениваемое размахом соответствующего распределения, может составить несколько порядков.

Во второй главе монографии упоминалось о необходимости анализа требований к транспортным ресурсам, формируемым всеми группами пользователей. Эти требования со временем меняются. Ведущая тенденция заключается в росте необходимой скорости обмена информацией на фоне более высоких показателей качества обслуживания трафика. Рост полосы пропускания обусловлен тенденцией, которая образно определена в [6]: "Мы движемся от бизнеса ушей к бизнесу глаз". Речь идет о возрастании трафика, который подразумевает обмен видеоинформацией.

Выделение типичных групп пользователей, для которых характерны существенные различия в требованиях к инфокоммуникационной системе, может быть сделано разными способами. В частности, в разделе 2.2 рассматривалась возможность введения трех групп пользователей, различающихся номиналами необходимых транспортных ресурсов. Для коммутируемых сетей такой подход не будет эффективным. Более важными становятся требования к производительности узлов коммутации (распределения информации).

Величина производительности узла коммутации – H определяется совокупностью параметров – $z_1, z_2, \ldots, z_m$, связанных с характеристиками обрабатываемого трафика и показателями качества обслуживания:

$$H = f(z_1, z_2, \ldots, z_m). \qquad (3.2)$$

Величина H может быть не идентичной для пользователей разных групп. Кроме того, она со временем будет изменяться. По этой причине целесообразно оперировать функциями вида $H_j(t, z_1, z_2, \ldots, z_m)$. Очевидно, что $j = \overline{1, G}$.

Соображения, изложенные выше, позволяют сформулировать следующие задачи прогнозирования, интересные для планирования коммутируемых сетей:

- деление всей совокупности клиентов Оператора связи – $N(t)$ на G типичных групп, каждая из которых насчитывает $N_j(t)$ пользователей ($j = \overline{1, G}$);
- прогнозирование изменений для функций вида $N_j(t)$;
- выбор таких функций $F_1(t, x_1, x_2, \ldots, x_k)$ и $F_2(t, y_1, y_2, \ldots, y_l)$, которые будут адекватно описывать эволюционные процессы для параметров трафика и показателей качества обслуживания;
- прогнозирование производительности узлов коммутации, отвечающих всем заданным показателям качества обслуживания трафика.

Методам решения этих задач посвящены четыре следующих параграфа. В двух последних параграфах раздела 3.2 приведены примеры использования предлагаемых методов и способы повышения точности прогностических оценок.

3.2.2. Типичные группы пользователей

Принципы выделения типичных групп пользователей должны выбираться с учетом цели прогнозирования. Для рассматриваемых задач интересны два классификационных признака. Первый из них ориентирован на расчет численности пользователей с точки зрения потенциальных рынков разных видов обслуживания, а второй – на оценку темпов формирования соответствующих групп.

Первый классификационный признак подразумевает ранжирование абонентов. Оно может быть выполнено разными способами. Например, компания IRG (Interactive Research Group) предложила следующую классификацию пользователей инфокоммуникационных услуг:

- сельские жители (Rural Survivors);
- малоимущая интеллигенция (Depressed Intelligentsia);
- жаждущие студенты (Hungry Students);

- консервативные пары (Conservative Couples);
- оптимистичные трудоголики (Optimistic Hard-Workers);
- молодые львы (Young Lions);
- птицы высокого полета (High Flyers).

Если для каждой $j-ой$ группы пользователей (в данном случае $G = 7$) известны все необходимые характеристики, то остается проследить за их динамикой. Получение этих характеристик можно рассматривать как результат целенаправленных маркетинговых исследований, проведение которых требует существенных финансовых затрат и занимает много времени.

Оператор связи может использовать собственную статистическую информацию, что позволяет упростить решение поставленной задачи. Правда, такой подход основан на обезличивании клиентов. Следовательно, теряются некоторые причинно-следственные связи. Операторы связи могут использовать статистические данные о платежах, которые взимаются с клиентов. Предположим, что эти платежи описываются случайной величиной x, которая подчиняется закону распределения $f(x)$. Очевидно, что функция $f(x)$ всегда определена на конечном интервале (x_{min}, x_{max}).

Иногда выделяются квартили соответствующей ФР. Квартилями называются квантили ФР, которые определены для ее значений, кратных 0,25. Два значения ФР, равные 0,25 и 0,75, называются левым и правым квартилями соответственно. Пятидесятипроцентный квартиль – это мода распределения. При использовании способа квартильного анализа $G = 4$. На практике квартильный анализ представляет собой простую процедуру. Величину $N(t)$ необходимо разделить на четыре слагаемых $N_j(t)$ так, чтобы величины платежей $D_j(t)$ для каждой из четырех групп были одинаковыми. Статистические данные вида $D_j(t)$ анализируются ежемесячно или один раз в квартал.

Исследование функций $N_j(t)$ и $D_j(t)$ позволяет установить аналогию с проблемой "цифрового разрыва" [7]. Этот аспект анализа доходов не входит в перечень вопросов, которые рассматриваются в монографии. Тем не менее, следует помнить о "цифровом разрыве", так как уже в обозримой перспективе его последствия могут отрицательно повлиять на развитие инфокоммуникационной системы. В ряде документов МСЭ можно найти информацию, касающуюся этого явления, известного по термину "*digital divide*". Данной проблемой обеспокоены и другие международные организации. Информацию об основных усилиях международного сообщества, направленных на преодоление цифрового разрыва, можно найти на сайтах Internet.

Второй классификационный признак полезен для ранжирования пользователей в составе группы. Для такой классификации целесообразно использовать типичную кривую, приведенную, например в [6]. Она предполагает выделение пяти типов пользователей: новаторы (innovator), ранние последователи (early adopters), раннее большинство (early majority), позднее большинство (late majority), поздние последователи (laggards).

Закон распределения типов пользователей удобно иллюстрировать при помощи гистограммы. Ее пример приведен на рисунке 3.3. Количественные соотношения между пятью группами пользователей выбраны произвольно. Эти соотношения меняются по весьма сложным законам, определяемые экономическими показателями и факторами, которые следует отнести к психологическим. Результаты ряда исследований, связанных с реакцией молодежи на появление новых видов инфокоммуникационных услуг, позволяют выдвинуть предположение о постепенном увеличении численности групп "Новаторы", "Ранние последователи" и "Раннее большинство".

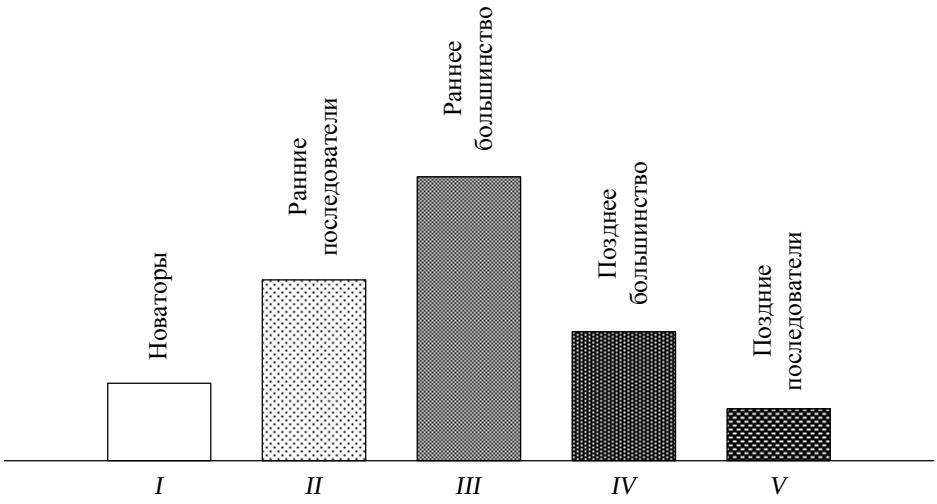


Рисунок 3.3. Пять типов пользователей в составе группы

Рассматриваемая классификация удобна для решения прогностических задач. Ее недостаток заключается в необходимости накопления информации, которая позволит ранжировать величины $N_j(t)$ на классы $N_j(k,t)$. Значение переменной k соответствует номеру класса, который на рисунке 3.3 указан римской цифрой. Следует подчеркнуть, что для анализа экономических показателей функции $N_j(t)$ и $D_j(t)$ образуют достаточный набор данных. Для решения ряда прогностических задач целесообразно оперировать функциями вида $N_j(k,t)$. Аспекты выбора этих функций рассматриваются в параграфе 3.2.4.

При планировании сетей связи для предприятий важным фактором считается количество сотрудников. МСЭ в [8] предложил такую классификацию предприятий:

- малые (small) – до 10 сотрудников;
- средние (medium) – от 10 до 50 сотрудников;
- крупные (large) – свыше 50 сотрудников.

Существуют и другие варианты классификации предприятий. Например, компания Analysys Mason предлагает увеличить количество сотрудников для каждой из трех групп предприятий:

- малые (small) – до 20 сотрудников;
- средние (medium) – от 20 до 499 сотрудников;
- крупные (large) – свыше 500 сотрудников.

В одном из отчетов компании Pyramid Research количество работников в малых предприятиях составляет от 25 до 199. Если же численность сотрудников находится в диапазоне от 200 до 999, то такое предприятие относится к группе средних. В крупной организации работает свыше 1000 человек. Причем учитываются только те сотрудники, которые работают на полную ставку (*full-time employees*).

Вероятно, для каждого проекта и с учетом региональных особенностей может быть выбрана одна из упомянутых классификаций. Не исключено, что в некоторых случаях целесообразно использовать иные способы классификации.

В деловом секторе распределение пользователей по объему потребляемых услуг представляет практический интерес для администрации предприятий. Оператор связи получает плату за эти услуги от одного юридического лица. Иная ситуация характерна для распределения пользователей квартирного сектора по уровню платы за предоставленные телекоммуникационные услуги. Для соответствующих исследований иногда используется не квартильный, а децильный анализ, то есть выделяется не четыре, а десять типичных групп пользователей. Пример распределения платы от пользователей квартирного сектора показан на рисунке 3.4. Гистограмма, приведенная на этом рисунке, заимствована из [9].

Рисунок 3.4. Распределение счетов за телекоммуникационные услуги

Объединив некоторые статистические данные, можно перейти к гистограмме, для которой будет использоваться квартильный анализ. Такая операция полезна для сравнения статистических данных, классифицированных по разным признакам. Более важным – с практической точки зрения – представляется оценка устойчивости полученных данных по мере развития инфокоммуникационной системы. Данный вопрос рассматривается в следующем параграфе.

3.2.3. Изменения в типичных группах пользователей

В конце XX столетия в нескольких журналах были представлены прогнозы развития мобильной связи в России. Ошибки большинства прогнозов чрезвычайно велики. Уже к 2005 году расхождение с реальной статистикой можно было оценить как десятикратное. Пессимистические оценки прогнозистов вполне объяснимы. Те тарифы, которые были установлены на услуги мобильной связи, не позволяли надеяться на ощутимый рост количества абонентов. Когда тарифы были снижены до приемлемого уровня, начался быстрый рост количества абонентов мобильной связи. Этот процесс сопровождался ростом расходов на услуги электросвязи. По данным, приведенным, например, в [10], расходы россиян на услуги электросвязи в 2000 году составляли 1,6% от совокупного дохода, а через пять лет эта величина возросла до 3,4%. В течение двух следующих лет эти расходы оставались неизменными.

Значимость инфокоммуникационных услуг стала существенной. В частности, опрос жителей Великобритании, проведенные в 2008 году, выявил интересные закономерности:

- даже в условиях экономического спада 90% респондентов предпочитают отказаться от некоторых товаров и услуг, но не от Internet;
- только 3% пользователей Internet готово экономить на доступе во всемирную паутину.

Не исключено, что надежда производителей телекоммуникационного оборудования на появление класса "ненасытных потребителей" становится все ближе к реальности. Действительно, уже в обозримой перспективе ряды пожилых людей пополнят те, кто ныне активно использует персональные компьютеры, всемирную паутину и терминалы мобильной связи. Следует также учитывать изменения психологического характера, касающиеся повышения ценности ряда видов связи для некоторых (в первую очередь – молодежных) групп пользователей. Это означает, что спектр услуг, за которые готовы платить пользователи, будет постепенно расширяться.

Пока поддержка большого числа услуг остается лишь важным конкурентоспособным преимуществом на рынке инфокоммуникационного оборудования. На простой вопрос: "Какой из двух мобильных телефонов с разными функциональными возможностями и одинаковой стоимости Вы выберите?" дается, как правило, один ответ. Будет куплен тот терминал, который имеет больше функций. Почти всегда респондент – за исключением значительной части молодых людей – соглашается, что в приобретаемом мобильном телефоне он не будет пользоваться никакими новыми возможностями.

Изменения в типичных группах пользователей можно рассматривать с двух точек зрения. Во-первых, очень интересны процессы, обусловленные объективными причинами развития общества, научно-техническим прогрессом и сменой поколений. Эти процессы могут быть описаны функциями со сравнительно медленно меняющимся трендом. Им свойственен эволюционный характер. Во-вторых, важны процессы, которые регулируются Операторами связи через тарифную политику. Статистические данные свидетельствуют, что существуют пороговые значения тарифов. Дальнейшее снижение тарифов приводит к быстрым (практически – к революционным) изменениям на инфокоммуникационном рынке. Оператор связи, снижая тарифы, должен быть уверен, что эксплуатируемая сеть готова к последующей реакции пользователей.

Аспекты, касающиеся изменений в типичных группах пользователей, – предмет для дополнительного исследования. Оно должно проводиться с использованием тех методов, которые разработаны для решения аналогичных задач в экономике и в психологии. Более того, результаты некоторых исследований экономического и психологического характера могут дать полезную информацию для специалистов в области инфокоммуникационных систем, если ее анализ прямо либо косвенно позволяет решить прогностические задачи, актуальные для планирования сети.

3.2.4. Выбор прогностических кривых

Выбор прогностических кривых $F_j(t)$ из их совокупности, которая приведена в четвертом Приложении к монографии, осуществляется с учетом поставленной задачи. Для задач планирования сети очень важны долгосрочные прогнозы, на основе которых выбирается оборудование. Очевидно, что в задачах, касающихся коммутируемых сетей, переменную t можно ограничить сроком службы (*lifetime*) для систем распределения информации – T_{LT}. В некоторых публикациях величину T_{LT} называют временем жизни (дословный перевод термина "lifetime") или жизненным циклом (*life cycle*).

Акцент на сроке службы подразумевает *переосмысление* цели прогнозирования. Это, в свою очередь, влечет за собой изменение методики прогнозирования. Выбор значения T_{LT} – не столь сложная задача. Очевидно, что оно должно быть больше периода окупаемости оборудования, но вряд ли превысит 10 – 15 лет с учетом быстрой смены технологий распределения и обработки информации. Выбрав номинал T_{LT} или диапазон наиболее вероятных изменений, следует оценить значение функции $F_j(t)$ для $t = T_{LT}$. После этого выбирается вид прогностической кривой $F_j(t)$ для периода времени (t_0, T_{LT}). С учетом обозначений, введенных в разделе 2.2, величины T_{LT} и t_f эквивалентны. Далее, в основном, будет фигурировать величина t_f.

Изменение требований к производительности оборудования коммутации показано на рисунке 3.5. Кроме кривой $F_j(t)$ нарисована также и ступенчатая функция $H(t)$. Она определяет те величины приращений производительности узла коммутации, которые характерны для выбранного устройства распределения информации. Функции $F_j(t)$ и $H(t)$ заданы для отрезка времени (t_0, t_f).

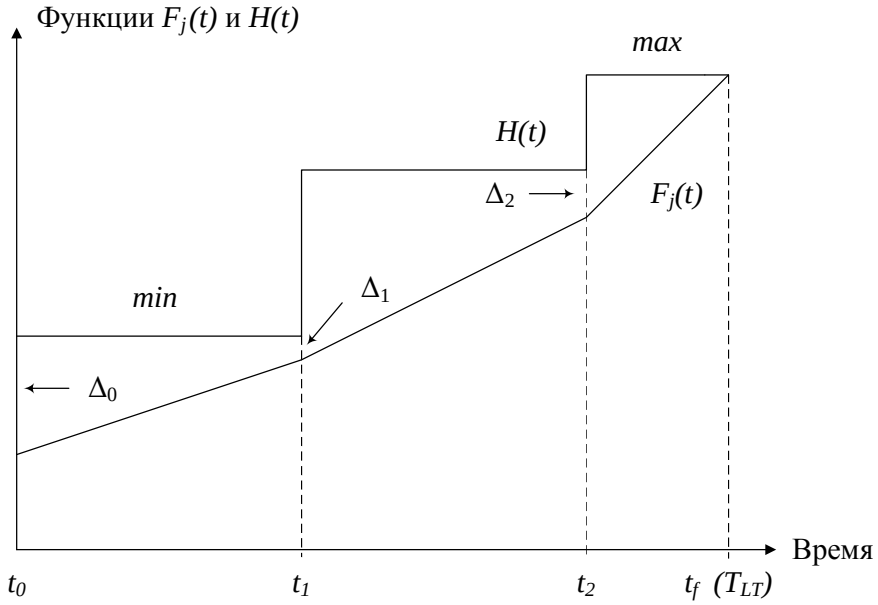


Рисунок 3.5. Изменение требований к производительности оборудования коммутации

Предположим, что кривая $F_j(t)$ может быть представлена функцией следующего вида:

$$F_j(t) = \begin{cases} a_1 + b_1 t, & при\ t_0 \le t < t_1 \\ a_2 + b_2 t, & при\ t_1 \le t < t_2 \\ a_3 + b_3 t, & при\ t_2 \le t \le t_f \end{cases}. \qquad (3.3)$$

Вид коммутационного оборудования выбирается так, чтобы в точке t_f выполнялось неравенство $H(t) \ge F_j(t)$. Чем меньше разница $H(t) - F_j(t)$, тем удачнее выбор Оператора связи. Для рассматриваемой иллюстрации предполагается, что $H(t_f) \approx F_j(t_f)$.

Оборудование коммутации вводится в эксплуатацию в момент времени t_0. Разница $H(t_0) - F_j(t_0)$ обозначена через Δ_0. Эта величина может быть весьма существенной. К моменту времени t_1 необходимо повысить производительность средств коммутации. В точке t_1 функция $H(t)$ увеличивается скачком. Слева – относительно точки t_1 – различие между значениями необходимой и потенциально возможной производительностью равно Δ_1. Она не столь велика как Δ_0. Справа от точки t_1 разница $H(t) - F_j(t)$, становится ощутимой. Аналогичный процесс характерен и для точки t_2.

В течение срока службы коммутационного оборудования $\left(t_0, t_f\right)$ функция $H(t)$ изменяется от минимума (min) к максимуму (max). Минимальная величина определяется типом выбранного оборудования, который, в свою очередь, зависит и от оценки $H(t_f)$. Метод расчета величины $H(t_f)$ приведен в следующем параграфе. Цель этого параграфа заключается в выборе набора функций $F_j(t)$, корректно описывающих процессы роста производительности на отрезке времени (t_0, t_f). Утверждение, что производительность будет неубывающей функцией от времени, не требует доказательств. Необходимо выбрать совокупность функций – M $\left(j = \overline{1, M}\right)$, а также подобрать аналитические выражения, которые адекватно отражают наиболее вероятные изменения номиналов для требуемой производительности средств распределения информации.

Обычно функции $F_j(t)$ выбираются из монотонно возрастающих кривых. Подобные кривые часто используются в прогнозировании. На рисунке 3.6 приведены три примера функций $F_j(t)$. По оси ординат все кривые определены между минимальным – H_{min} и максимальным – H_{max} значениями, которые приняты идентичными для рассматриваемых функций. По этой причине сравнение функций $F_j(t)$ между собой по амплитуде нельзя считать корректным. По оси ординат все кривые определены на одном и том же отрезке – $\left(t_0, t_f\right)$. Ряд интересных аппроксимаций функций вида $F_j(t)$ приведен в [11, 12].

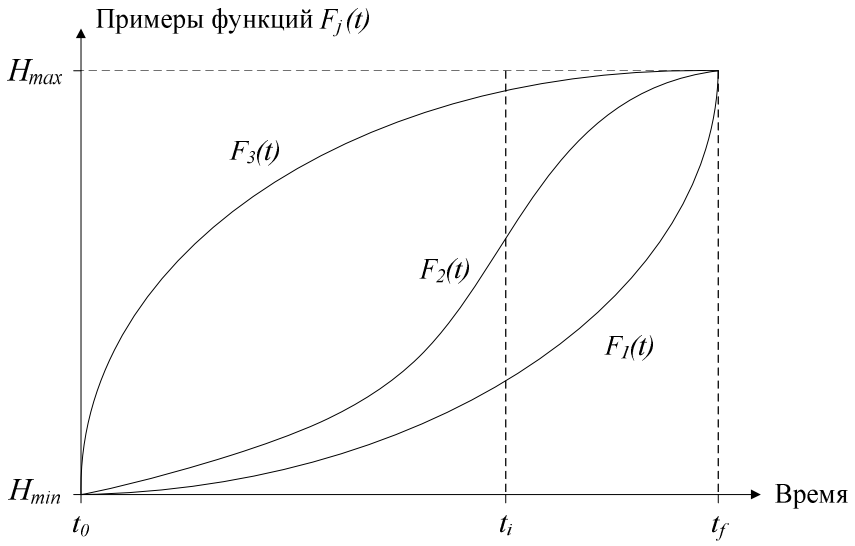


Рисунок 3.6. Три примера прогностических кривых

Следует отметить важную особенность прогнозирования характеристик, подобных производительности. Иногда они оцениваются косвенно – на основе прогнозов, которые были получены для других атрибутов сети. В этом плане интересен анализ показателей, анонсируемых разработчиками маршрутизаторов для оборудования $i-го$ типа. Для максимальных величин пропускной способности – $C_{max}(i)$ и производительности – $H_{max}(i)$ с приемлемой точностью можно установить линейную зависимость такого рода:

$$C_{max}(i) = \alpha_i H_{max}(i). \tag{3.4}$$

Коэффициент пропорциональности α_i зависит от типа оборудования. Сравнивая информацию о величинах $C_{max}(i)$ и $H_{max}(i)$, публикуемую разработчиками оборудования коммутации, можно определить среднее значение этого коэффициента – $\alpha^{(1)}$ и область изменения α_i: границы α_{min} и α_{max}. Такой подход можно считать *одним из возможных путей оценки* производительности средств коммутации в IP сетях.

Вернемся к выбору вида функций класса $F_j(t)$. Функция $F_1(t)$ предполагает, что рост производительности средств коммутации близок к экспоненциальному закону:

$$F_1(t) = ae^{bt}. \tag{3.5}$$

Судя по прогнозам пропускной способности транспортных сетей, рассмотренным во второй главе, экспоненциальный закон может оказаться приемлемой аппроксимацией для оценки пропускной способности средств распределения информации. По крайней мере, для некоторых отрезков времени рост пропускной способности хорошо аппроксимируется экспонентой. Данное утверждение справедливо также и для начального этапа процесса, представленного при помощи функции $F_2(t)$. На отрезке $\left(t_0, t_f\right)$ подобные функции сле-

дует рассматривать как S-образные кривые [13, 14]. В некой точке t_i меняется ход кривой. Типичным примером функции $F_2(t)$ служит логистическая кривая, для которой справедливо такое выражение:

$$F_2(t) = \frac{a}{1 + ce^{-bt}}. \tag{3.6}$$

Функция $F_3(t)$ используется для формализации процессов с быстрым ростом в течение сравнительно короткого периода времени. Затем начинается фаза "насыщения". Простейшим примером функции $F_3(t)$ можно считать такую зависимость:

$$F_3(t) = a\sqrt[b]{t}. \tag{3.7}$$

Параметры a, b и c для рассматриваемых функций обычно определяются методом наименьших квадратов [15]. Для вычисления этих параметров используется доступная статистическая информация и гипотезы, касающиеся поведения функций $F_j(t)$.

Вид функций $F_j(t)$ важен для оценки тех моментов времени, когда необходимо производить наращивание производительности средств распределения информации. Два таких момента времени t_1 и t_2 показаны на рисунке 3.5. В большинстве современных телекоммуникационных сетей налажена система контроля характеристик, которые связаны с качеством обслуживания трафика. Доступная информация позволяет с высокой (для решения практических задач) точностью оценить приближения к моментам времени t_1 и t_2. Тогда задачу прогнозирования можно свести к оценке величины $H(t_f)$. Выбор величины t_f в качестве граничной точки при решении прогностических задач не влияет на методику оценки производительности для средств распределения информации.

3.2.5. Оценка производительности средств распределения информации

В этом параграфе изложены соображения, касающиеся прогноза величины $H(t_f)$. С учетом характера решаемой задачи можно говорить об оценке вида *maximum maximorum.* Действительно, для того, чтобы в течение периода времени T_{LT} не потребовалась замена узла коммутации, необходимо определить требования к максимальной величине его производительности. В принципе, период времени T_{LT} можно разделить на два (и даже более) отрезка времени. Для каждого такого отрезка времени можно использовать разные типы узлов коммутации. Такое решение также может оказаться экономически выгодным. Метод оценки производительности $H(t_f)$ не меняется. Задача заключается только в замене величины t_f некой переменной t_d, для которой справедливо такое условие: $t_0 < t_d < t_f$.

В качестве прогностической оценки $H(t_f)$ интересна величина производительности для одного ИПС (в технической литературе на английском языке он обозначается как UNI – User Network Interface). Аналогичный подход использован для прогностических оценок пропускной способности транспортной сети – рисунок 2.3 во второй главе монографии. По оси ординат на этом рисунке указана доля домохозяйств. В той системе понятий, которая обычно используется связистами, оценки количества домохозяйств и интерфейсов пользователь-сеть обычно совпадают.

Предположим, что соотношение (3.4) останется справедливым на отрезке времени (t_0, t_f). Далее практический интерес представляет величина коэффициента α_i в момент времени t_f. По всей видимости, изменение значения коэффициента α_i для разных индексов i к моменту времени t_f не будет существенным. Это утверждение основано на посто-

янном повышении требований пользователей к качеству обслуживания, что будет стимулировать разработчиков оборудования к обеспечению общепринятого (к моменту времени t_f) уровня производительности средств коммутации. С учетом изложенных соображений вместо коэффициента α_i далее будет использоваться величина α_f.

Для решения прогностических задач целесообразно ввести еще одно допущение. Оно касается различий длительности задержки IP-пакетов разного приоритета. Подобные различия будут со временем стираться. Такая гипотеза подтверждается статистическими данными об эволюции показателей качества передачи речи. По мере развития ТФОП абоненты стали предъявлять все более жесткие требования к качеству связи. В [16] приведены интересные данные, иллюстрирующие эту тенденцию. Одним из способов оценки качества передачи речи через ТФОП можно считать определение эквивалентного расстояния между разговаривающими людьми. Соответствующая таблица, которая была опубликована в [16], приведена во второй главе монографии.

Величина, названная "эквивалентным расстоянием", может быть выражена через остаточное затухание [16]. Оно определяется в точках, где подключаются терминалы. Для ТФОП эта точка, как правило, соответствует месту размещения телефонной розетки. В телекоммуникационной сети общего вида речь идет об ИПС, который в рекомендациях МСЭ обозначается символами T или S/T – в зависимости от способа подключения терминального оборудования.

При прогнозировании вероятных значений $H(t_f)$ следует считать, что большинство пользователей будут выбирать нулевой класс обслуживания [17], который гарантирует минимальное время передачи IP-пакетов между интерфейсами пользователь-сеть. В свою очередь, минимизация времени передачи IP-пакетов обеспечивается повышением уровня производительности средств коммутации. Из теории телетрафика хорошо известно, что минимизация дисперсии времени задержки IP-пакетов может достигаться снижением нагрузки линий передачи и систем коммутации. Этот факт также следует учитывать при оценке величины $H(t_f)$ за счет введения в состав знаменателя формулы (3.4) множителя ρ_f – нагрузки узла коммутации. Теперь можно записать следующую формулу для оценки величины $H(t_f)$:

$$H(t_f) = \frac{C(t_f)}{\alpha_f \rho_f}. \tag{3.8}$$

Величина $C(t_f)$ определяет пропускную способность ИПС к моменту времени t_f. Из материалов второй главы монографии следует, что приемлемой оценкой для величины $C(t_f)$ следует считать номинал 100 Мбит/с. Эта величина будет рассматриваться как уровень пропускной способности в ЧНН.

В электронной версии журнала "Технологии и средства связи" [18] приведены такие данные о средних величинах скорости широкополосного доступа, используемой в конце 2009 года: в США – 2,3 Мбит/с, во Франции – 17 Мбит/с, в Южной Корее – 49 Мбит/с, в Японии – 63 Мбит/с. Разброс оценок весьма существенен, но сведения для Японии и Южной Кореи, свидетельствуют, что величину 100 Мбит/с нельзя считать завышенной. Более того, в [19] приведен прогноз компании Infonetics Research, который допускает рост требований к скорости обмена информацией через сеть доступа до 1000 Мбит/с. Похожая величина указана в отчете [20]. По этой причине для ЧНН целесообразно рассматривать, как минимум, два уровня величины $C(t_f)$: 100 Мбит/с и 1000 Мбит/с.

3.2.6. Пример разработки прогнозов

Соображения, которые были изложены в предыдущих параграфах, целесообразно проиллюстрировать на примере задач, возникающих в процессе модернизации сети доступа. Обсуждение подобных задач позволяет конкретизировать положения, которые формулируются на основе теоретических конструкций.

Рассмотрим проект, связанный с подключением пользователей на территории новой застройки. Предположим, что заканчивается строительство двух новых зданий. Первое здание – деловой центр, в котором будут размещены три организации с разным уровнем спроса на инфокоммуникационные услуги. Второе здание – жилой дом, в котором можно выделить два типичных вида пользователей, различающиеся уровнем платежеспособного спроса на инфокоммуникационные услуги. Рядом с этими двумя зданиями расположен "старый" жилой дом с восьмьюдесятью квартирами, к которому от распределительного шкафа был проложен кабель, состоящий из ста пар. Рассматриваемая модель показана на рисунке 3.7. Никаких других строений, радикально меняющих состав пользователей или требования к предоставляемым услугам, в обозримой перспективе не ожидается.

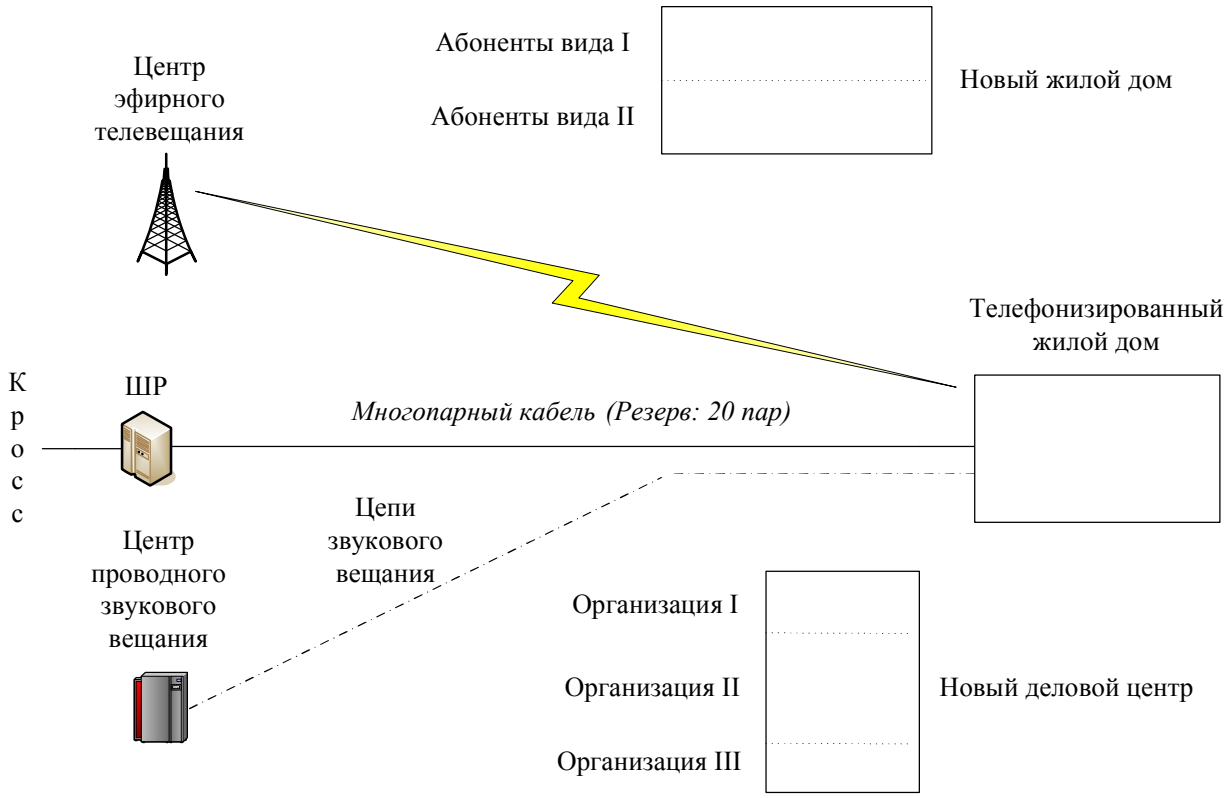


Рисунок 3.7. Модель модернизируемого фрагмента сети доступа

Сначала необходимо провести анализ тех исходных данных, которые имеются в распоряжении прогнозиста. Доступная информация обычно представима следующим набором данных:

- сведения о потенциальных абонентах, которые, как правило, нельзя считать полными и достоверными;
- статистическая информация по аналогичным объектам, которые похожи на прогнозируемые или же идентичны им.

Получение полных и достоверных данных о потенциальных абонентах – редкий случай. Анализ ряда выполненных работ показал, что обычно Оператор не предоставляет примерно 20% запрашиваемых данных (часто – самых необходимых). Сопровождение выполненных работ позволяет оценить ошибки в предоставленных статистических материалах. Величины этих ошибок зависят, в основном, от способа хранения исходной информации. Например, количество междугородных вызовов, которое накапливается в фай-

лах системы учета трафика в АМТС, можно считать данными с очень высокой достоверностью. Ошибка в количестве абонентов, обслуживаемых ГТС или СТС, в среднем составляет 10%. Эти сведения не всеми Операторами обновляются регулярно. Кроме того, на точность подобных показателей существенно влияют принятые правила подсчета клиентской базы. Минимальная достоверность свойственна статистическим данным по видам услуг. Типичная величина ошибок для предоставляемых сведений по услугам находится в диапазоне от 10 до 30%.

Имеющиеся оценки можно использовать для одного фрагмента модернизируемой сети – телефонизированного дома. Для двух новых зданий, жилого дома и делового центра, целесообразно собрать доступные сведения по клиентской базе, анализ которых должен быть дополнен статистикой по аналогичным объектам. Для нового жилого дома (для него далее будет использоваться верхний индекс h – первая буква в слове "home") начальная численность абонентов, пользующихся фиксированным доступом в ТФОП – $N^h(t_0)$, может быть рассчитана следующим образом:

$$N^h(t_0) = N_I^h(t_0) + N_{II}^h(t_0). \tag{3.9}$$

В этой формуле нижние индексы "I" и "II" указывают на соответствующий вид абонентов. В следующей формуле индексы "I", "II" и "III" определяют количество терминалов, имеющих право выхода в ТФОП, для организаций с тем же номером. Такой подход допустим в том случае, когда все три организации для телефонной связи устанавливают УАТС. Для делового центра далее вводится индекс b – первая буква в слове "business". Выражение для подсчета $N^b(t_0)$ можно представить такой суммой:

$$N^b(t_0) = N_I^b(t_0) + N_{II}^b(t_0) + N_{III}^b(t_0). \tag{3.10}$$

Оценка слагаемых в формулах (3.9) и (3.10) может осуществляться при проведении маркетинговых исследований [21, 22]. Одна из задач прогнозирования заключается в оценке величин $N^h(t_x)$ и $N^b(t_x)$. В рассматриваемом примере $t_x \le t_f$. Следует учесть, что вероятные изменения оцениваемых величин связаны с двумя причинами, создающими диаметрально противоположные эффекты:

- в ряде квартир требуется организация дополнительной АЛ, а при расширении предприятий может возрастать количество тех абонентов, которым разрешен выход в ТФОП;
- в квартирном и деловом секторах происходит постепенное снижение числа абонентов фиксированной ТФОП за счет выбора некоторыми пользователями обслуживания речевого трафика средствами мобильной связи или IP сетью.

Предположим далее, что проведение маркетинговых исследований было признано Оператором нецелесообразным, но имеются весьма достоверные статистические данные, полученные в результате реализации похожих проектов. Эти данные позволяют оценить слагаемые, входящие в формулы (3.9) и (3.10), с приемлемой для практики точностью. Они приведены в таблице 3.1. Следует подчеркнуть, что каждое слагаемое, в свою очередь, может быть представлено суммой, определяемой формулой (3.1), или же иным способом.

Таблица 3.1. Количество терминалов ТФОП к моменту времени t_0

Новый жилой дом		Новый деловой центр		
Вид I	Вид II	Организация I	Организация II	Организация III
30	70	120	200	80

Получение оценок $N^h(t)$ и $N^b(t)$ для периода прогнозирования от трех до пяти лет также может осуществляться на основе опыта Оператора. Результаты прогнозирования

приведены в таблице 3.2. Все величины выбраны произвольно, но с учетом характера изменений спроса абонентов на разные виды инфокоммуникационных услуг.

Таблица 3.2. Оценки количества терминалов ТФОП для краткосрочного прогноза

Новый жилой дом		Новый деловой центр		
Вид *I*	Вид *II*	Организация *I*	Организация *II*	Организация *III*
50	50	150	200	100

Для абонентов нового жилого дома в следующей таблице приведен пример оценки численности пользователей, различающихся уровнем спроса на инфокоммуникационные услуги. В рассматриваемом примере эти пользователи делятся на три группы, которые учитываются в формуле (3.1). Результаты для начального этапа модернизации сети доступа и к моменту времени t_x соответствуют общим тенденциям эволюции клиентской базы. Они приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Оценки количества терминалов ТФОП к моменту времени t_x

Номер группы	Распределение абонентов нового жилого дома по группам			
	$N_I^h(t_0)$	$N_I^h(t_x)$	$N_{II}^h(t_0)$	$N_{II}^h(t_x)$
Группа 1	15	10	40	30
Группа 2	10	15	30	30
Группа 3	5	25	0	10
Итого:	30	50	70	70

Теперь можно оценить пропускную способность сети доступа, которая необходима абонентам нового жилого дома. Для этого необходимо знать номиналы пропускной способности, которые используются абонентами $k-ой$ группы в настоящее время – $C_k(t_0)$ и будут востребованы к моменту времени t_x – $C_k(t_x)$. Предположим, что величины $C_k(t_0)$ и $C_k(t_x)$ известны из ряда проектов, которые были выбраны в качестве аналогов. Оценки этих величин приведены в таблице 3.4. Допустим, что номиналы $C_k(t_0)$ и $C_k(t_x)$ идентичны для абонентов обоих видов.

Таблица 3.4. Оценки пропускной способности к моменту времени t_x

Номер группы	Номинал $C_k(t_0)$	Номинал $C_k(t_x)$
Группа 1	64 кбит/с	64 кбит/с
Группа 2	2 Мбит/с	25 Мбит/с
Группа 3	25 Мбит/с	50 Мбит/с

Из данных, содержащихся в таблицах 3.3 и 3.4, несложно определить суммарную пропускную способность транспортных ресурсов для абонентов нового жилого дома. Аналогично могут быть получены оценки для всех групп, пользователей, расположенных на территории модернизируемого фрагмента сети доступа. С этой целью следует оценить значения, приведенные в таблицах 3.3 и 3.4, для телефонизированного жилого дома и нового делового центра.

Предположим, что для телефонизированного жилого дома нет смысла в делении абонентов на два вида. Такая гипотеза может оказаться справедливой, если уровень спроса на инфокоммуникационные услуги примерно одинаков для всех домохозяйств. Конечно, допустимы и другие предположения, что не влияет на методологию прогнозирования исследуемых показателей.

В таблице 3.5 приведены гипотетические оценки количества абонентов $N^p(t_0)$ и $N^p(t_x)$, а также требуемой пропускной способности $C_k^p(t_0)$ и $C_k^p(t_x)$. Индекс p – первая буква в слове "phone", которая подчеркивает тот факт, что дом уже телефонизирован.

Таблица 3.5. Прогностические оценки для телефонизированного дома

Номер группы	Данные для абонентов телефонизированного дома			
	$N^p(t_0)$	$N^p(t_x)$	$C_k^p(t_0)$	$C_k^p(t_x)$
Группа 1	75	50	64 кбит/с	64 кбит/с
Группа 2	5	25	2 Мбит/с	2 Мбит/с
Группа 3	0	5	25 Мбит/с	25 Мбит/с
Итого:	80	80	*Данные не определяются*	

Для получения итоговых оценок необходимо знать средние номиналы $C_k(t_0)$ и $C_k(t_x)$, характерные для одного пользователя в новом деловом центре. Они приведены в таблице 3.6. Предполагается, что услуги для абонентов нового делового центра не будут включать возможности доступа к каналам телевизионного вещания.

Таблица 3.6. Предполагаемые номиналы $C_k(t_0)$ и $C_k(t_x)$

Номер группы	Номинал $C_k(t_0)$	Номинал $C_k(t_x)$
Организация *I*	1 Мбит/с	1 Мбит/с
Организация *II*	2 Мбит/с	4 Мбит/с
Организация *III*	8 Мбит/с	12 Мбит/с

В таблице 3.7 приведены результаты расчета требуемой пропускной способности для периода времени (t_0, t_x). Следует подчеркнуть, что полученные данные представляют собой усредненные оценки. В каждом конкретном случае, если имеется возможность, целесообразно проводить маркетинговые исследования.

Таблица 3.7. Итоговые прогностические оценки пропускной способности

Объекты в составе модернизируемой сети доступа	Пропускная способность	
	$t = t_0$	$t = t_x$
Телефонизированный жилой дом		
Итого для телефонизированного дома	15 Мбит/с	178 Мбит/с
Новый жилой дом		
Абоненты вида *I*	146 Мбит/с	1626 Мбит/с
Абоненты вида *II*	63 Мбит/с	312 Мбит/с
Итого для нового жилого дома	209 Мбит/с	1938 Мбит/с
Новый деловой центр		
Организация *I*	120 Мбит/с	150 Мбит/с
Организация *II*	400 Мбит/с	800 Мбит/с
Организация *III*	640 Мбит/с	1200 Мбит/с
Итого для нового делового центра	1160 Мбит/с	2150 Мбит/с
Суммарная величина для сети доступа	1384 Мбит/с	4266 Мбит/с

Судя по результатам вычислений, пропускная способность модернизируемого фрагмента сети доступа возрастет за период времени (t_0, t_x) примерно в три раза. Для обоих жилых домов пропускная способность увеличивается практически на порядок. В деловом центре темпы роста скромнее. Пропускная способность даже не удваивается. Такая ситуация объясняется отсутствием телевизионного трафика в составе тех услуг, которые востребованы в деловом секторе.

Для планирования сети доступа может стать полезной оценка транспортных ресурсов, выраженная в количестве трактов STM. Один тракт STM-1 мультиплексирует 63 потока E1. Каждый поток E1 позволяет обмениваться информацией со скоростью 2048 кбит/с [23]. К моменту времени t_x для "старого" жилого дома потребуется всего два тракта STM-1. Эта величина получена после округления до целого значения в бо̀льшую сторо-

ну результата деления требуемой пропускной способности (178 Мбит/с) на суммарную скорость передачи 63 потоков E1. Вследствие округления образуется запас пропускной способности, который может оказаться полезным в том случае, если спрос превысит прогнозируемую величину. Аналогичные вычисления для новых зданий – жилого дома и делового центра – дают такие оценки: к моменту времени t_x потребуется шестнадцать и семнадцать трактов STM-1 соответственно.

Результаты прогноза позволяют сделать ряд важных выводов. Для рассматриваемой задачи целесообразно выделить одно важное положение: не следует ориентироваться на имеющиеся ресурсы – многопарный кабель.

Одно из возможных решений для модернизации рассматриваемого фрагмента сети доступа показано на рисунке 3.8. Оно основано на прокладке кабеля с ОВ между двумя оптическими мультиплексорами ввода/вывода каналов (ОМВК). Первый мультиплексор расположен в кроссе (концентратора или коммутационной станции), а второй – рядом с тремя зданиями, обслуживаемыми сетью доступа. Предполагается, что от второго ОМВК до телефонизированного жилого дома используется эксплуатируемый кабель. К новым зданиям прокладывается кабель с ОВ.

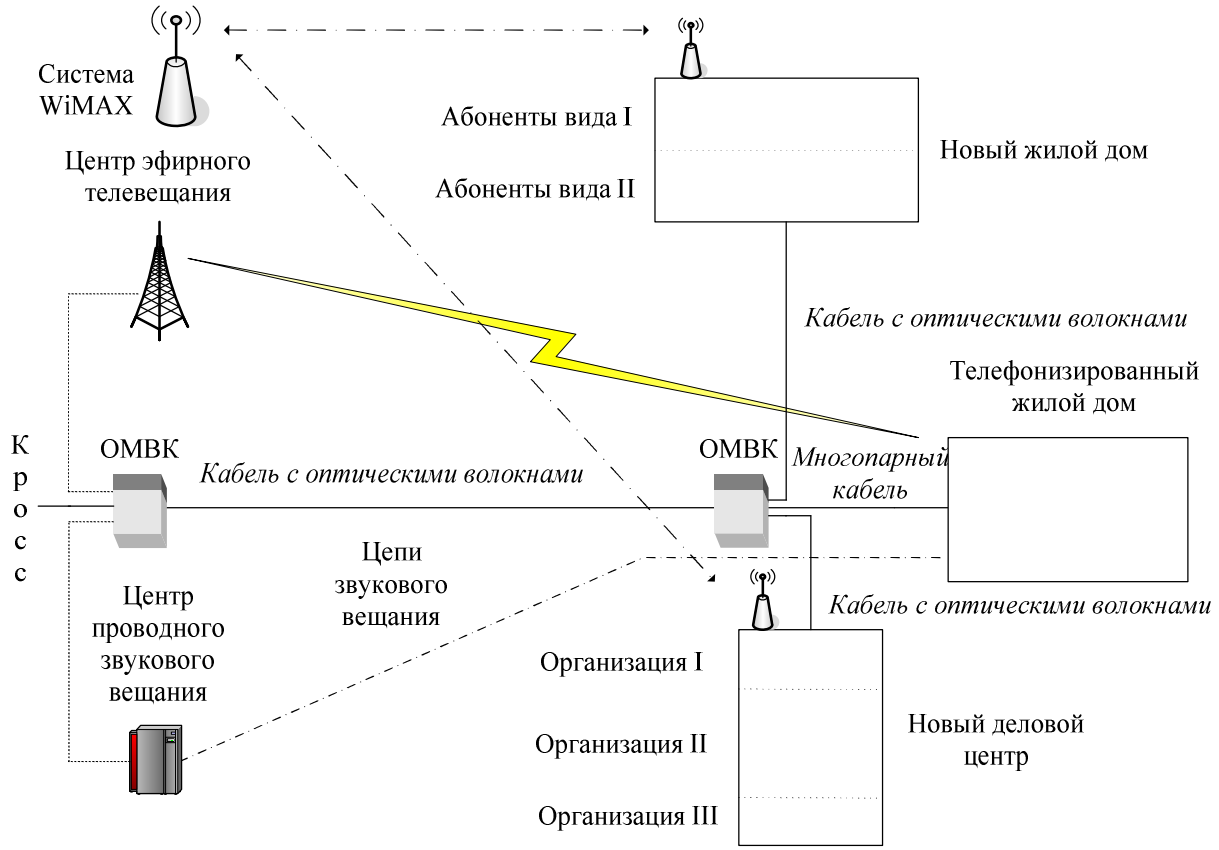


Рисунок 3.8. Пример модернизации фрагмента сети доступа

Функции ОМВК заключаются в объединении и разделении цифровых потоков без преобразования оптических сигналов в электрические [24]. Это оборудование кроссовой коммутации обеспечивает эффективное построение транспортных сетей любого уровня иерархии, а также управление их ресурсами.

Предположим, что программы телевизионного и звукового вещания в новые здания доставляются по кабелю с ОВ. Для тех пользователей, которые заключили с Оператором соглашения об уровне обслуживания (они известны по уже упоминавшейся аббревиатуре SLA), ресурсы доступа – полностью или частично – дублируются [25]. Выбор пропускной способности при переходе на резерв осуществляется пользователями и Оператором. При выборе этой величины учитываются бизнес-процессы пользователей, а также технические

возможности, которыми располагает Оператор. В предложенной модели резервирование обеспечивается системой широкополосного доступа WiMAX [26].

Важный аспект интерпретации результатов прогнозирования – оценка их точности. Эта оценка выполняется стандартными методами [12, 27, 28]. Некоторые соображения по оценке точности прогнозирования изложены в Приложении 4. Ряд вопросов, касающихся интерпретации результатов прогнозирования, рассматривается в последнем параграфе этого раздела. Он посвящен основным направлениям исследований и разработок, цель которых заключается в повышении точности прогнозов.

3.2.7. Повышение точности прогнозов

Переход к ССП или же к сети, основанной на иных принципах (нельзя исключать возможность смены парадигмы развития инфокоммуникационной системы, принятой *de facto*), означает расширение спектра поддерживаемых услуг за счет видов обслуживания, которые подразумевают использование высокоскоростных каналов обмена информацией. Именно услуги подобного рода определяют пропускную способность транспортной сети. В этом несложно убедиться на примере телефонизации нового жилого дома, в котором насчитывается тысяча квартир. Допустим, что некоторой доле абонентов – p_B интересны широкополосные услуги. Предположим, что все услуги такого рода ориентированы на полосу пропускания c_B. Для телефонной связи используются ОЦК с пропускной способностью 64 кбит/с (в общем случае – c_N). Обозначим суммарную численность абонентов телефонной сети, проживающих в новом доме, как K_S. Используем такую оценку:

$$C_S = K_S(c_N + p_B c_B). \tag{3.11}$$

Величину C_S можно рассматривать как требуемую скорость передачи той части сети доступа, которая ограничена территорией дома. Подобные утверждения справедливы при некоторых допущениях, касающихся технологии обмена информацией. Поэтому лучше оперировать словосочетанием "оценка пропускной способности".

Учитывая, что в некоторых квартирах может устанавливаться более одной АЛ [8], примем, что $K_S = 1200$. Тогда можно найти численные значения введенной выше оценки C_S для разных значений и доли абонентов, заинтересованных в широкополосных услугах (p_B), и величин пропускной способности (c_B). Результаты вычислений приведены в таблице 3.8 как отношение следующего вида:

$$\frac{c_N}{c_N + p_B c_B}. \tag{3.12}$$

Полученная величина определяет долю транспортных ресурсов, необходимую для обслуживания трафика речи.

Таблица 3.8. Доля транспортных ресурсов, используемая для обслуживания трафика речи

c_B, Мбит/с	p_B = 0	p_B = 2%	p_B = 4%	p_B = 6%	p_B = 8%	p_B = 10%
2	1,000	0,615	0,444	0,348	0,286	0,242
10	1,000	0,242	0,138	0,096	0,074	0,060
25	1,000	0,113	0,060	0,041	0,031	0,025
50	1,000	0,060	0,031	0,021	0,016	0,013
100	1,000	0,031	0,016	0,011	0,008	0,006

Второй столбец таблицы 3.10 соответствует тому периоду времени, когда спрос на широкополосные услуги отсутствует. Все транспортные ресурсы предназначены только

для телефонной связи. Если 10% пользователей (последний столбец таблицы) оплачивают широкополосные услуги, которые обеспечиваются с помощью цифровых каналов с пропускной способностью 2 Мбит/с, то для телефонной связи необходимо примерно четверть транспортных ресурсов. Такая же доля транспортных ресурсов для обслуживания телефонного трафика выделяется для 2% пользователей широкополосных услуг (третий столбец таблицы), если они поддерживаются каналами с пропускной способностью 10 Мбит/с. При использовании более высоких скоростей обмена информацией для введения широкополосных услуг доля транспортных ресурсов, предназначенных для телефонной связи становится незначительной. Рост скорости обмена данными приводит к повышению производительности средств коммутации.

Оценки, приведенные в таблице 3.8, свидетельствуют, что объем транспортных ресурсов будет, в основном, определяться пропускной способностью, которая необходима для поддержки широкополосных услуг. Следовательно, в процессе разработки проектных решений очень важна высокая точность прогнозирования рынка широкополосных услуг.

Часть задач по оценке производительности средств коммутации может успешно решаться с помощью известных методов прогнозирования. Для задач некоторых видов необходимо разработать новые методы прогнозирования. Новизна этих методов будет проявляться в следующем:

- оригинальный математический аппарат для получения оценок исследуемых процессов;
- междисциплинарный подход к прогнозированию.

В 70-х годах XX века российскими специалистами, внесшими значительных вклад в развитие электросвязи и написавшими замечательные книги [2, 3], была высказана интересная гипотеза. Ее суть состоит в том, что в перспективе будут разработаны общие методы для расчета характеристик качества обслуживания и передачи информации. В сетях, которые основаны на стеке протоколов TCP/IP, зависимость качества передачи речи от задержки пакетов давно стала очевидной. Предвидеть подобное при использовании исключительно технологии коммутации каналов – выдающееся достижение.

Попробуем трансформировать упомянутую идею об общности методов предсказания на значения дискретного сигнала и величины спроса на инфокоммуникационную услугу. По всей видимости, такой подход соответствует концепции фильтра Калмана [29], но многим специалистам ближе математический аппарат, используемый в теории передачи сигналов. Следует также отметить, что для оценки дискретных сигналов получен ряд результатов, которые полезны для прогнозирования. Суть подхода к разработке нового метода прогнозирования иллюстрирует рисунок 3.9. На нем показано изменение функции $F(t)$, характеризующей прогнозируемый процесс.

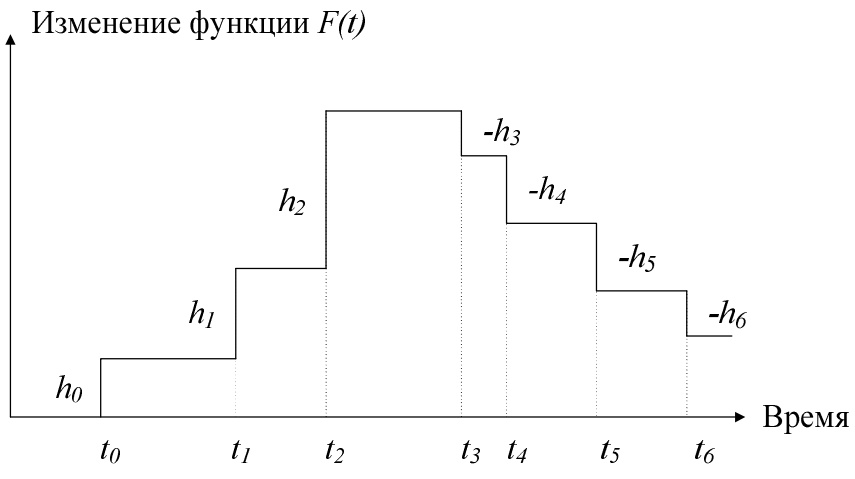


Рисунок 3.9. Пример изменения функции $F(t)$

Функцию $F(t)$ можно рассматривать как кривую, отражающую изменение спроса на одну из инфокоммуникационных услуг в конкретные моменты времени t_j. Характерным примером процесса, показанного на рисунке 3.9, может служить изменение спроса на услуги персонального радиовызова, которые обычно называли пейджинг (от глагола *to page* в английском языке – передавать сообщение). Эта же функция похожа на случайный сигнал с приращениями h_j, которые могут происходить в моменты времени t_j.

Зная значения h_0, h_1 и h_2, можно высказать предположение о следующем изменении – h_3. Если оно ошибочно (например, ожидался дальнейший рост исследуемой функции, а произошло ее снижение), то прогноз корректируется. Допустим, что в момент времени t_3 начался спад функции $F(t)$. Тогда все значения h_j для $j \geq 3$ становятся отрицательными. Прогнозированию такого рода присущи элементы адаптации, похожие на свойства приемника, который обрабатывает случайный сигнал с предсказанием его ожидаемого значения.

По всей видимости, подобный метод прогнозирования будет весьма эффективен для некоторых приложений. В качестве характерного примера применения методов такого рода можно назвать краткосрочное прогнозирование спроса на услуги, которые мало похожи на другие виды обслуживания.

Применение междисциплинарных методов прогнозирования можно рассматривать как решение одной и той же задачи разными методами. Простейший пример – история с оценками численности абонентов сотовых сетей, которые независимо проводились разными методами Операторами мобильной связи и "Аналитическим Центром Юрия Левады" [30]. Различие полученных результатов позволяет уточнить важные положения развития рынка мобильной связи.

Междисциплинарный подход может стать весьма продуктивным для повышения точности прогнозов при анализе процессов, обычно выпадающих из поля зрения связистов. Очень важен анализ современных градостроительных тенденций, процессов расселения коммунальных квартир, изменений условий жизни в сельской местности. Более простой пример можно привести для модели, показанной на рисунке 3.8. В частности, некоторые компании меняют офисы. Возможно, через несколько лет вместо трех организаций в новом деловом центре будет находиться одна компания с весьма специфическими требованиями к перечню инфокоммуникационных услуг. Не исключена иная ситуация: в деловом центре будет размещаться десять небольших компаний. Их требования к услугам связи предсказать невозможно.

Платежеспособный спрос на инфокоммуникационные услуги в значительной мере определяется финансовыми ресурсами. Это утверждение известно с 1963 года, в котором А. Джипп опубликовал статью "Благосостояние нации и телефонная плотность". В этой работе была доказана зависимость между телефонной плотностью и ВВП, приходящимся на душу населения. Характер спроса на инфокоммуникационные услуги существенно зависит от неравномерности доходов. Соответствующие вопросы исследованы в ряде работ профессора Л.Е. Варакина [7, 31]. Результаты, изложенных в этих монографиях, помогут повысить точность некоторых прогнозов. Ряд дополнительных соображений об использовании результатов А. Джиппа с учетом современных процессов развития системы электросвязи можно найти в Приложении 4.

Очень перспективным представляется исследование цикличности в развитии рынка инфокоммуникационных услуг. Не исключено, что идеи выдающихся российских ученых Н.Д. Кондратьева и А.В. Чаянова [7, 32] применимы для отрасли "Связь" [33]. После выявления таких циклов (аналогов "длинных волн" Н.Д. Кондратьева) ошибки прогнозирования можно будет свести к тому минимуму, который приемлем для решения большинства практически важных задач.

Прогрессом мы обязаны людям, которые придерживаются непопулярных взглядов.
(Э.Стивенсон)

3.3. Сценарии развития коммутируемых сетей

3.3.1. Классификация сценариев развития коммутируемых сетей

Сценарии дальнейшего развития коммутируемых сетей можно классифицировать разными способами [34]. В значительной мере эти сценарии определяются стратегией модернизации инфокоммуникационной системы, которая выбрана Оператором связи. По этой причине сначала следует выделить основные стратегии, которые будут определять эволюцию инфокоммуникационной системы в целом. На рисунке 3.10 приведены четыре типичные стратегии, различающиеся основными системными решениями.

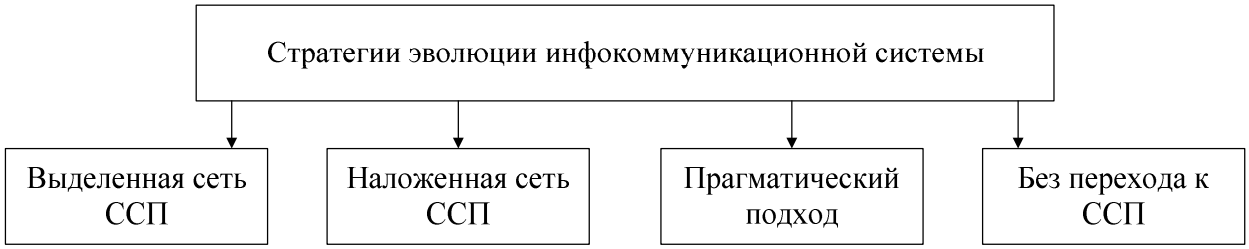


Рисунок 3.10. Классификация стратегий эволюции инфокоммуникационной системы

Первая стратегия подразумевает построение выделенной сети для поддержки услуг ССП. Выделенные сети в англоязычной технической литературе известны по термину *"dedicated network"*. Этот подход напоминает практику построения цифровых сетей на основе технологии "коммутация каналов" в 90-х годах прошлого века. Выделенные сети были ориентированы на обслуживание малочисленной группы абонентов, согласных оплачивать современные инфокоммуникационные услуги по высоким тарифам, обычно превосходящим общемировой уровень. Построение сетей такого рода было оправданным шагом, так как существовавшая в СССР система электросвязи не могла обеспечить резко возросший спрос на новые виды инфокоммуникационных услуг. С другой стороны, создание выделенных сетей всегда активизирует механизмы *bypass* [24, 35]. В результате, как правило, начинается стагнация сетей общего пользования. По этой причине в тексте Генерального соглашения по торговле услугами (General Agreement on Trade in Services – GATS) обращается особое внимание на необходимость государственного управления механизмами bypass.

В настоящее время нет серьезных объективных причин для построения ССП в виде выделенной сети, предназначенной для небольшой группы пользователей. Тем не менее, если Операторы ТФОП в течение нескольких ближайших лет не начнут формирование ССП, то создание выделенных сетей станет единственным средством поддержки ряда новых видов обслуживания. В этом случае построением ССП займутся другие Операторы связи.

Вторая и третья стратегии основаны на построении сети ССП общего пользования. Принципы реализации наложенной сети ССП и прагматического подхода изложены в Приложении 5. В настоящее время именно эти две стратегии представляются самыми перспективными с точки зрения долгосрочных планов развития инфокоммуникационной системы. Сценарии развития коммутируемых сетей, которые рассматриваются ниже, детализируют идеи наложенной сети ССП и прагматического подхода. Тем не менее, ряд сценариев развития коммутируемых сетей может оказаться полезным и при выборе других стратегий развития инфокоммуникационной системы.

Четвертая стратегия развития инфокоммуникационной системы не предусматривает переход к ССП. Не следует считать такой выбор Оператора ТФОП ошибочным. В ряде

случаев подобное решение может оказаться вполне естественным на некотором отрезке времени.

Для реализации каждой стратегии эволюции инфокоммуникационной системы, как правило, можно разработать несколько сценариев. В этом разделе будут рассматриваться только сценарии развития коммутируемых сетей. Более того, при анализе этих сценариев учитывается, что основная цель излагаемых соображений – решение задач планирования сети. Это предопределяет принципы классификации рассматриваемых сценариев.

Предлагаемая классификация приведена на рисунке 3.11. Она основана на трех классификационных признаках – таксонах [34]. В качестве первого таксона фигурирует стратегия модернизации инфокоммуникационной системы. Стратегия часто существенно влияет на характер сценария развития коммутируемых сетей. Второй таксон связан со структурой сети. Основное внимание при выборе структуры сети, как и во второй главе, будет уделяться абонентскому доступу. Технологии, используемые для построения ССП, относятся к третьему таксону. В данном случае технологии тесно связаны с видами оборудования, которое может быть использовано для построения ССП.

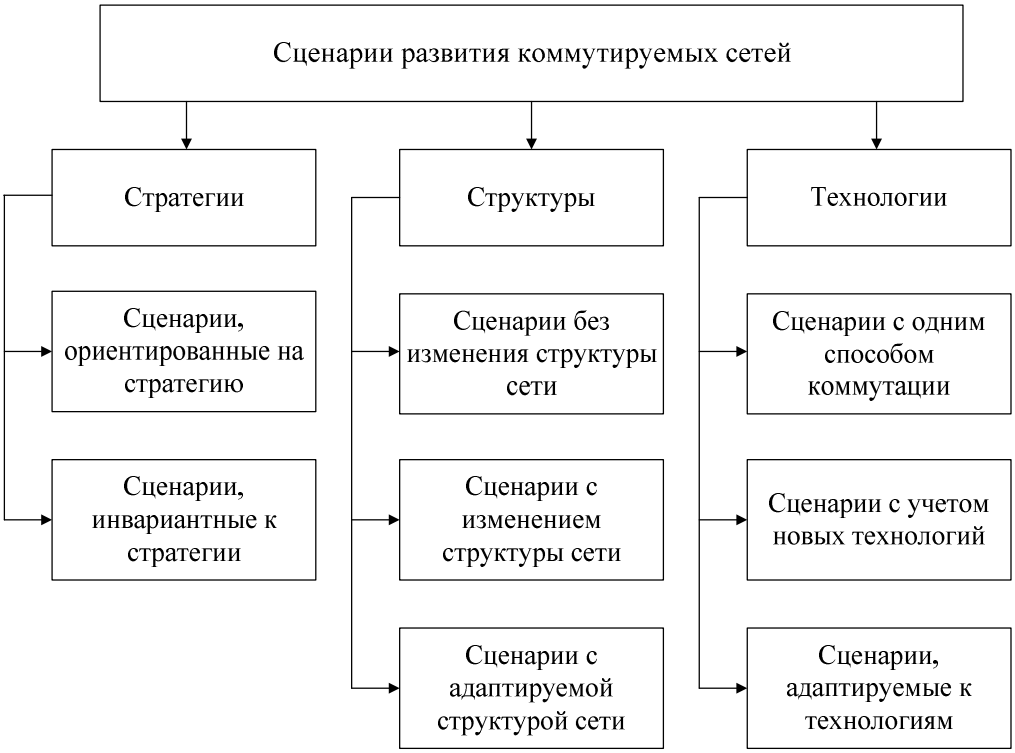


Рисунок 3.11. Классификация сценариев развития коммутируемых сетей

Стратегия развития инфокоммуникационной системы, выбранная Оператором связи, предопределяет набор сценариев, которые могут рассматриваться в качестве возможных решений. Существуют сценарии, которые ориентированы на конкретную стратегию. Они не могут быть реализованы при выборе другой стратегии. Самый простой пример такого сценария – использование новых станций с коммутацией каналов. Подобное решение выглядит логичным для стратегии, которая названа на рисунке 3.10 "Без перехода к ССП". Оно не годится для любой другой стратегии развития инфокоммуникационной системы. Значительная часть сценариев эволюции коммутируемых сетей инвариантна к выбранной стратегии.

Структура коммутируемой сети в процессе модернизации инфокоммуникационной системы может не меняться. Такое решение будет самым простым с точки зрения задач, которые решаются при планировании сети, но, как правило, не самым удачным по соображениям технико-экономического характера. Обычно экономически эффективны те сценарии, которые подразумевают изменение структуры эксплуатируемой сети [25, 36]. Рациональный выбор новой структуры коммутируемой сети возможен в том случае, если

разработана соответствующая методика. Основные аспекты разработки такой методики изложены в параграфе 3.3.2.

Сценарии с адаптируемой структурой сети основаны на поиске так называемого "устойчивого развития". Данный термин чаще используется в экономике [37] и в экологии [38]. Сценарии с адаптируемой структурой коммутируемой сети отличаются результатами анализа на чувствительность [39]. В некоторых случаях инвестиции в модернизацию коммутируемой сети в наиболее вероятном диапазоне изменения ключевых параметров инфокоммуникационной системы меняются несущественно. Соответствующим сценариям свойственно "устойчивое развитие".

Классификация сценариев развития коммутируемой сети с технологической точки зрения основана на выделении способа распределения информации. Сценарии, которые используют один способ распределения информации, подразумевают превентивный выбор вида коммутации – либо каналов, либо пакетов. Такое решение применяется для построения ССП, так как способ распределения информации для коммутируемой сети этого вида уже выбран.

Некоторые специалисты не исключают возможность появления новой технологии распределения информации. Возможно, что она будет более всего похожа на технологию "коммутация каналов" [40]. Учитывая это обстоятельство, целесообразно выбирать такие сценарии, которые учитывают возможность появления новых способов распределения информации. Лучше всего, постараться найти сценарии, адаптируемые к технологиям. Следует учитывать, что подобный подход ограничивает количество возможных решений. Кроме того, попытка заранее учесть возможные технологические изменения обычно ведет к росту начальных инвестиций.

В качестве рационального системного решения следует выбрать сценарий развития гипотетической коммутируемой сети, который отвечает трем условиям. Во-первых, он инвариантен к стратегии модернизации инфокоммуникационной системы. Во-вторых, подразумевает выбор такой структуры, которая адаптируется к изменению требований к коммутируемой сети. В-третьих, он учитывает возможность появления новых способов распределения информации.

3.3.2. Выбор структуры коммутируемой сети

Классический подход к выбору структуры коммутируемой сети заключается в поиске экстремума целевой функции $F(x_1, x_2, ..., x_k)$, который определяет важнейший из экономических показателей. Если таким показателем становится доход Оператора, то необходимо найти максимум целевой функции. Чаще выбирается показатель, напрямую связанный с капитальными или приведенными затратами. Тогда требуется определить минимум целевой функции.

Существенная часть переменных x_i, называемых параметрами оптимизации [41], обычно характеризует требования, которым должна отвечать планируемая сеть. Для большинства практических задач удается записать равенства или неравенства такого вида:

$$x_i = x_{i0}, \quad x_i \geq x_{i0}, \quad x_i \leq x_{i0}. \tag{3.13}$$

Величина x_{i0} определяет нормированное значение $i-го$ показателя. Допустим, что в качестве первого показателя фигурирует допустимая вероятность отказа в установлении соединения. Пусть $x_{i1} = 0,02$. Тогда величина производительности всех узлов коммутации в эксплуатируемой коммутируемой сети должна быть рассчитана так, чтобы соблюдалось условие: $x_1 \leq 0,02$.

При разработке плана модернизации коммутируемой сети один из параметров оптимизации – x_j обычно удается выразить через остальные, количество которых составляет $k-1$. Тогда $k-1$ параметров оптимизации исключаются из целевой функции [41]. Задача

оптимизации сводится к поиску экстремального значения скалярной функции – $f(x_j)$ с областью определения – $D(f)$.

Для задач планирования коммутируемой сети $D(f)$ является подмножеством положительных действительных чисел – $\mathbb{R}_+$. Функция $f(x_j)$, как правило, напрямую связана с затратами на построение сети. Тогда задача проектировщика заключается в нахождении наименьшего значения функции $f(x_j)$:

$$f(x_j) \to min, \quad x_j \in D(f) \subset \mathbb{R}_+. \tag{3.14}$$

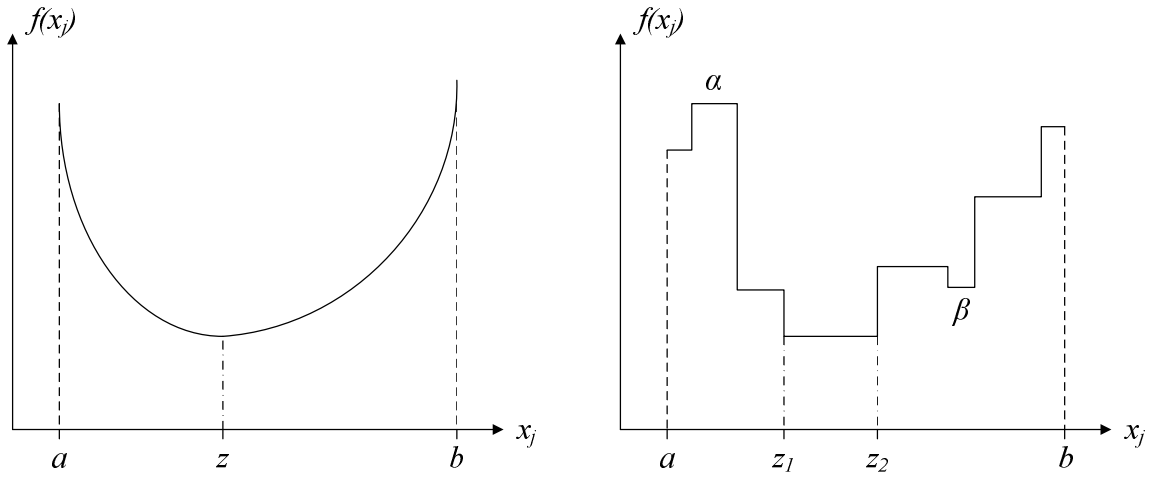
Для сетей доступа поиск минимального значения функции вида $f(x_j)$ может быть сведен к нахождению количества выносных модулей – n в границах пристанционного участка. Это означает, что решение следует искать среди элементов множества целых чисел – $\mathbb{Z}$. В этом случае выражение (3.14) целесообразно представить в такой редакции:

$$f(n) \to min, \quad n \in D(f) \subset \mathbb{Z}. \tag{3.15}$$

Не исключено, что для исследуемой функции на множестве $D(f)$ не существует наименьшего значения. В этом случае следует найти точную нижнюю границу функции $f(x_j)$. Формулировка (3.14) приобретает следующий вид [41]:

$$f(x_j) \to inf, \quad x_j \in D(f) \subset \mathbb{R}_+. \tag{3.16}$$

Примеры оптимизационных задач часто связаны с унимодальными функциями. Если такая функция определена на интервале $[a,b]$, то можно найти точку z. Для этой точки справедливы такие особенности: на отрезке $[a,z)$ функция $f(x_j)$ убывает, а на отрезке $(z,b]$ – возрастает. Пример такой унимодальной функции $f(x_j)$ приведен в левой части рисунка 3.12. В правой части этого же рисунка показано поведение функции вида $f(x_j)$, которое характерно для многих задач планирования коммутируемых сетей. Важная особенность функции $f(x_j)$ заключается в том, что существует некий интервал (z_1, z_2), в границах которого наблюдается искомый минимум.



а) Пример унимодальной функции с минимальным значением в точке *z*

б) Пример функции *f(xj)*, типичной для задач планирования сети

Рисунок 3.12. Два примера функции $f(x_j)$

Для нахождения минимума функции, показанной в левой части рисунка 3.12, можно использовать известный метод, который основан на анализе значений производных от

$f(x_j)$. Подобный подход не годится для ступенчатых функций, пример которых приведен в правой части рисунка 3.12. Для нахождения интервала (z_1, z_2) можно использовать методы прямого поиска [41]. Аппроксимация ступенчатой функции унимодальной кривой может привести к искажению функции $f(x_j)$. В частности, отрезки, обозначенные на рисунке 3.12 буквами α и β, обычно выпадают из поля зрения исследователя. Более того, точка z может оказаться вне интервала (z_1, z_2), если аппроксимирующая кривая выбрана без учета специфических особенностей исследуемого объекта. Для повышения точности поиска оптимального решения целесообразно использовать ступенчатые функции. Это возможно при совпадении двух условий:

- ступенчатая функция лучше отражает характер поведения зависимости $f(x_j)$ в области изменений аргумента, представляющей практический интерес;
- над этими функциями возможны все те математические операции, которые предусмотрены методами планирования сетей.

Подобные соображения отражают методологический подход к выбору структуры коммутируемой сети. Для перевода соответствующих экономико-математических методов в практическую плоскость следует подробно проанализировать принципы разработки математических моделей коммутируемой сети на всех уровнях ее иерархии. С учетом построения национальной инфокоммуникационной системы целесообразно выделить три иерархических уровня: междугородный, внутризоновый и местный. В составе последнего следует отдельно рассматривать уровень доступа, что обусловлено возрастающей ролью этого компонента инфокоммуникационной системы и значительными затратами на его модернизацию [42].

Основные задачи выбора структуры междугородной коммутируемой сети можно сформулировать в процессе анализа ее фрагмента, который показан на рисунке 3.13. Эта модель основана на фрагменте транспортной сети, который приведен во второй главе монографии на рисунке 2.57. Для рассматриваемой модели предполагается, что в качестве узлов распределения информации используются магистральные коммутаторы (МК).

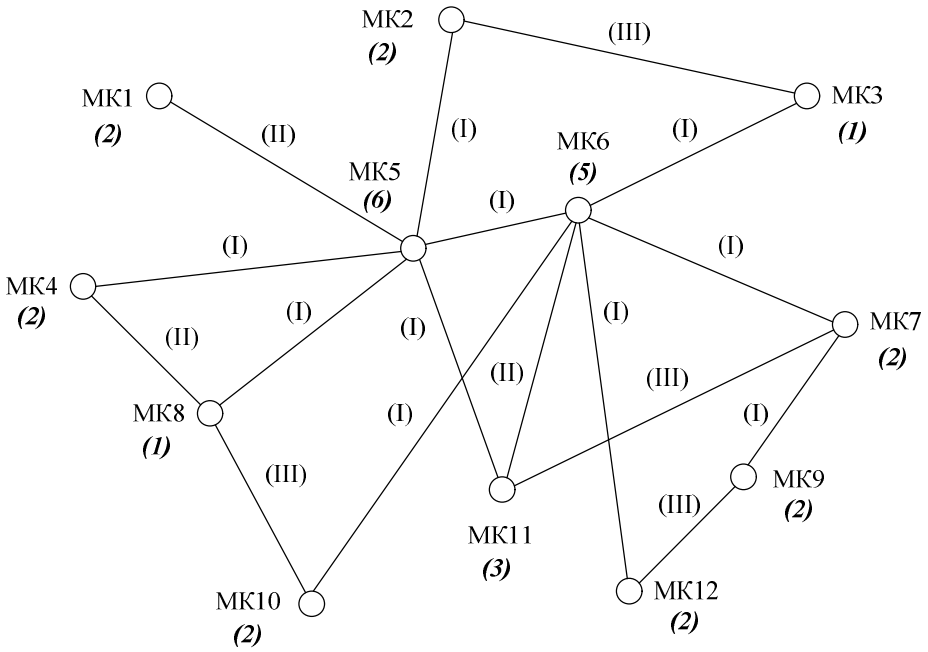


Рисунок 3.13. Модель фрагмента междугородной коммутируемой сети

Обычно МК и СУ с идентичными номерами размещаются на одной площадке. Для каждого МК в скобках указано количество линий, инцидентных СУ с тем же номером.

Соответствующая цифра определяет надежность транспортной сети и, следовательно, инфокоммуникационной системы в целом.

Структура коммутируемой сети образуется за счет установления полупостоянных кроссовых соединениях в СУ. Римская цифра определяет количество линий передачи, образующих междугородный тракт между двумя смежными МК. Например, СУ8 (он показан на рисунке 2.57) включен в транспортную сеть одной линией передачи. За счет полупостоянных соединений в СУ4, СУ5, СУ6 и СУ10 организуются три прямых междугородных тракта от МК8 к МК4, МК5 и МК10.

Места размещения МК известны. Они находятся в центрах субъектов Федерации. В ряде случаев оборудование МК размещается и в других городах, которые также известны. Таким образом, в качестве модели междугородной коммутируемой сети можно выбрать граф, в котором точно определены координаты размещения всех вершин. Более того, структура связи вершин (расположение ребер) к моменту разработки системного проекта уже создана. Не столь важно, была ли оптимальна структура связи вершин исследуемого графа. Извлекать ребра (демонтировать линии передачи) нет никакого смысла. Скорее всего, задачу модернизации междугородной коммутируемой сети следует рассматривать как введение новых ребер для обеспечения требований инфокоммуникационной системы в части надежности и живучести междугородной сети [43]. С точки зрения теории графов речь идет о задаче эффективного введения новых ребер. Эффективность, в данном случае, напрямую связана с выполнением условия (2.44).

Это условие можно рассматривать как требование топологического характера. С другой стороны, для каждой линии передачи транспортной сети необходимо определить пропускную способность. Такая задача может быть решена только на основе требований коммутируемых сетей. Чтобы сформулировать эти требования, необходимо решить, по крайней мере, две задачи:

- расчет исходящего – $Y_i^{исх}(t)$, входящего – $Y_i^{вх}(t)$ и внутризонового – $Y_i^{вз}(t)$ трафика для каждого $i-го$ МК;
- оценка трафика между каждой парой МК – $Y_{ij}(t)$, учитывая также ту его часть, которая определяется требованиями внутризоновой связи – $Y_{ii}(t)$.

Следует отметить, что $Y_{ii}(t) = Y_i^{вз}(t)$. Значение t зависит от того периода времени, на который решаются задачи планирования коммутируемой сети. Идеальный случай: $t = t_f$. Достоверность долгосрочного прогноза, как правило, очень мала. По этой причине изменения величины t обычно лежат в диапазоне от трех до пяти лет.

Целесообразность ограничения периода прогнозирования обусловлена еще одним важным обстоятельством. Величины $Y_i^{исх}(t)$, $Y_i^{вх}(t)$ и $Y_i^{вз}(t)$ – для мультисервисной сети – следует рассматривать как вектора, чтобы отразить особенности изменения разных видов трафика и характера его распределения, который определяет матрицу $\left\| Y_{ij}(t) \right\|$. Очевидно, что каждый элемент матрицы $Y_{ij}(t)$, если его измерять количеством IP-пакетов, можно представить в виде такой суммы:

$$Y_{ij}(t) = Y_{ij}^s(t) + Y_{ij}^d(t) + Y_{ij}^v(t) + \Delta_{ij}(t). \qquad (3.17)$$

Верхние индексы указывают на вид трафика: речь (s – speech), данные (d – data) и видео (v – video). Последнее слагаемое определяет все остальные виды трафика, которые обслуживаются коммутируемой сетью.

В настоящее время можно достоверно прогнозировать и величину трафика речи, и значения элементов матрицы $\left\| Y_{ij}^s(t) \right\|$. Существенно то, что на элементы матрицы $\left\| Y_{ij}^s(t) \right\|$ не влияют принципы построения сети. Распределение трафика речи зависит от других причин. Для междугородной телефонной связи одним из важнейших факторов остается "экономическое районирование" [44], что подтверждается статистическими данными [45].

Значения элементов матриц $\left\| Y_{ij}^{d}(t) \right\|$ и $\left\| Y_{ij}^{v}(t) \right\|$ зависят от решений, которые принимаются проектировщиками. Это утверждение проще всего подтвердить для трафика видео при помощи модели, приведенной на рисунке 3.14. Она иллюстрирует четыре способа размещения сервера видеоинформации, которая доступна пользователям коммутируемой сети.

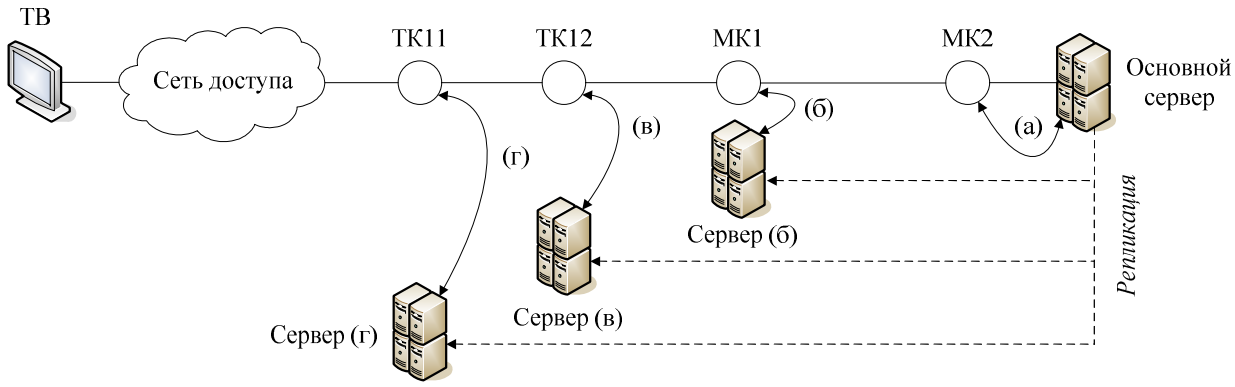


Рисунок 3.14. Размещение сервера видеоинформации и изменение трафика

Вариант (а) предусматривает размещение одного сервера, который назван основным. Даже при дублировании этого сервера трафик, в случае нахождения терминала в другом субъекте Федерации, будет проходить через несколько узлов коммутации. На рисунке 3.14, кроме МК1 и МК2, показаны два транзитных коммутатора (ТК), расположенных в местной сети. Для рассматриваемого варианта IP-пакеты, содержащие видеоинформацию, будут проходить, как минимум, через четыре коммутатора. При обращениях к основному серверу большой группы пользователей будут задействованы значительные транспортные ресурсы, а коммутаторам придется обрабатывать существенное количество IP-пакетов.

Если установить серверы рядом с каждым МК, как предусматривается при выборе варианта (б), то трафик, порожденный услугами получения видеоинформации, не будет загружать междугородную сеть. Исключением остается трафик при обмене IP-пакетами в процессе репликации данных (файлов с видеоинформацией).

МК1 будет задействован при внутризоновой связи. Это не представляется разумным при значительном трафике, который связан с получением видеоинформации, в границах зоновой сети. При реализации варианта (в) МК для рассматриваемого класса услуг не задействуются. Сервер включается в один из ТК, что "замыкает" соответствующий трафик в пределах местной сети. В модели, показанной на рисунке 3.14, функции подключения сервера выполняет ТК2. Следует отметить, что такое построение сети усложняет (иными словами – удорожает) процессы репликации данных.

Вариант (г) предусматривает подключение серверов к каждому ТК. В этом случае трафик не передается между узлами коммутации одной местной сети. С точки зрения экономии пропускной способности транспортной сети и производительности всех узлов коммутации этот вариант может считаться самым лучшим, но при разработке проекта необходимо опираться на результаты технико-экономического (а не качественного) анализа.

Важная особенность развития коммутируемых сетей заключается в существенном снижении количества узлов, выполняющих только транзитные функции. Во второй главе приводился пример Италии, в сети которой количество транзитных узлов сократилось с 66 до 24. Аналогичные тенденции характерны для коммутируемых сетей в большинстве развитых стран. Этому способствует несколько причин, из которых следует выделить радикальное снижение затрат на транспортные ресурсы [24, 46]. В результате модели структур коммутируемых сетей на всех уровнях иерархии становятся все более похожими на полносвязный граф.

Надежность связи между каждой парой коммутационных станций ТФОП обычно обеспечивалась за счет организации нескольких путей установления соединений. В левой

части рисунка 3.15 показан пример организации связи между АМТС1 и АМТС2. Помимо прямого пучка междугородных каналов предусмотрено два альтернативных пути – через УАК1 (узел автоматической коммутации) или через УАК2 и УАК3.

а) Организация связи между двумя АМТС в ТФОП

б) Организация связи между двумя МК в NGN

Рисунок 3.15. Установление соединений между узлами коммутации в ТФОП и в ССП

При переходе к ССП вместо АМТС устанавливаются МК, а функции УАК могут быть возложены на узлы кроссовой коммутации. Это означает, что функции транзита переносятся на нижний уровень модели взаимодействия открытых систем [47, 48]. Тогда между МК1 и МК2 – правый фрагмент рисунка 3.15 – организуются три прямых пучка междугородных трактов, но каждый их них проходит по разным направлениям. Одно из полезных свойств оборудования кроссовой коммутации заключается в том, что процесс установления соединений может осуществляться в зависимости от ситуации, которая возникает в сети. Это позволяет эффективно управлять транспортными ресурсами в сети междугородной связи. Минимизация количества транзитных узлов коммутации решает еще одну важную задачу – снижение длительности задержки IP-пакетов при их передаче между ИПС.

Для внутризоновой коммутируемой сети можно выделить два вида задач, которые связаны с выбором структуры. Первая группа задач касается участков, которые в ТФОП располагаются между ЦС (УСП) и АМТС. Соответствующие пучки ЗСЛ и СЛМ – в новом качестве – останутся и в сетях ССП. По этой причине перед проектировщиком не возникают проблемы выбора структуры сети. Ему необходимо решить задачи, косвенно связанные с оценкой трафика. Они не отличаются от задач, которые были рассмотрены для междугородной сети при переходе к ССП.

Вторая группа задач возникает в тех случаях, когда существенно меняется структура местных сетей. В терминах телефонной связи речь идет об участке РАТС – АМТС в составе городских сетей. При переходе к ССП на этом участке внутризоновой сети будут происходить заметные изменения, что требует анализа возможных системных решений. Такие решения целесообразно исследовать в процессе выбора структуры местных сетей, которые образуются в процессе модернизации ГТС и СТС.

В состав ГТС и СТС входят сети доступа. В модели инфокоммуникационной системы, предложенной МСЭ (она была воспроизведена на рисунке 1.32), сети доступа выделены в качестве самостоятельного компонента. При переходе к IP-технологиям в ряде публикаций был введен еще один компонент инфокоммуникационной системы. В концепции Metro Ethernet [49, 50], а также в ряде других новых решений по построению инфокоммуникационной системы он называется уровнем агрегации. Уровень агрегации расположен между сетью доступа и базовой сетью. В этом случае в функции базовой сети не включаются задачи обеспечения местной связи. Это означает, что уровень агрегации эквивалентен понятию "местная сеть электросвязи".

Авторы некоторых публикаций относят – не без оснований – к уровню агрегации и часть сети доступа. Можно считать, что модель МСЭ модифицируется с учетом новых идей развития инфокоммуникационной системы в целом. Этот процесс целесообразно проиллюстрировать на примере модели, показанной на рисунке 3.16. Верхняя часть иллю-

страции основана на двух центральных элементах модели МСЭ, которая была рассмотрена в параграфе 1.5.1.

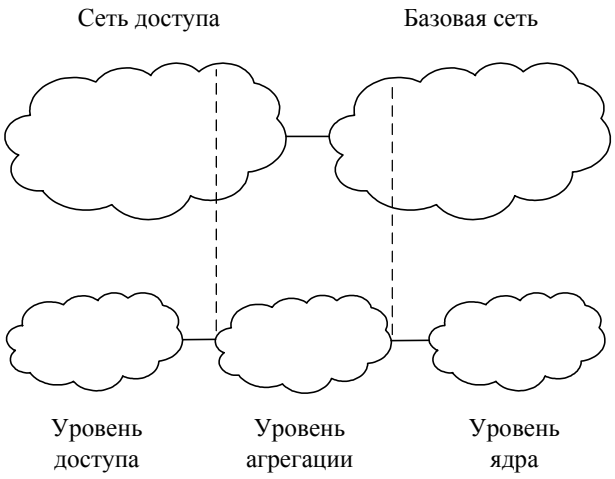


Рисунок 3.16. Модель инфокоммуникационной системы с уровнем агрегации

Изменение модели инфокоммуникационной системы обусловлено двумя факторами. Во-первых, при модернизации сетей доступа в них формируются фрагменты, в которых осуществляются функции концентрации. Соответствующую часть сети доступа лучше отнести к уровню агрегации. Кроме того, местные сети также можно ввести в состав уровня агрегации. Тогда правое верхнее облако на рисунке 3.16 будет состоять только из сетей междугородной и международной связи. Во-вторых, границы между "облаками", показанными в нижней части рисунка 3.16, иногда размываются. Подобный процесс отражает поиск оптимальных точек включения оборудования пользователей с разными потребностями в информационном обмене. Для Internet одно из возможных решений – переход к сети со структурой типа "медуза" [51]. Пример сети с такой структурой показан на рисунке 3.17. Предложенная модель состоит из трех уровней иерархии, которые пронумерованы римскими цифрами. В сеть включаются узлы трех разных типов, которые обозначены буквами A, B и C.

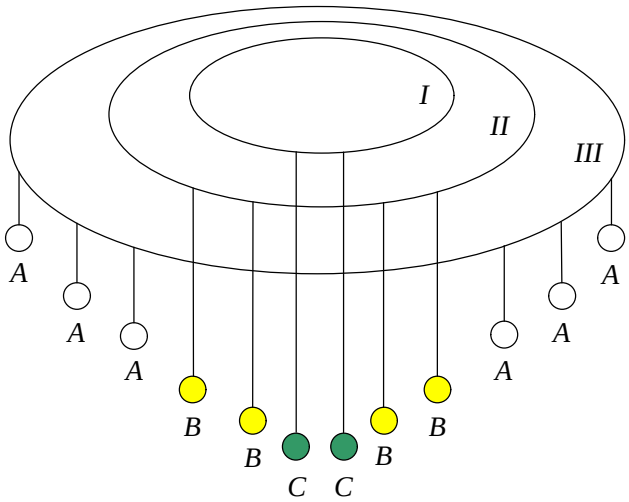


Рисунок 3.17. Сеть со структурой типа "медуза"

Структура эксплуатируемой ТФОП основана на жестких правилах выхода узлов – только в следующий иерархический уровень. Исключение из этого правила делалось в редких случаях. В частности, УАТС подключалась в транзитные узлы, а не в РАТС только при условии, что ее емкость превышала шесть тысяч номеров (в крупном городе обычно установлено не более двух-трех таких станций). По всей видимости, в ССП (по примеру

Internet) не будут столь же однозначно, как в ТФОП, устанавливаться принципы связи между узлами разных уровней иерархии.

С учетом подобных соображений выбор структуры внутризоновой связи не следует формулировать как самостоятельную задачу. Более того, для сетей класса ССП проще отказаться от этого уровня иерархии, который не выделяется Администрациями связи других стран. В этом разделе далее используется компромиссное решение. Вопросы организации внутризоновой связи рассматриваются при анализе структур местных сетей.

Возможности кроссовой коммутации позволяют строить коммутируемые сети любой структуры. Очень важно правильно сформулировать задачу, которую придется решать проектировщику. Прежде всего, необходимо перечислить обязательные условия, которые следует учитывать при выборе структуры коммутируемой сети. К ним можно отнести следующие положения:

- возможность изменения структуры коммутируемой сети при возникновении новых требований со стороны пользователей;
- минимизация количества транзитных узлов в устанавливаемых соединениях для обеспечения заданных показателей качества обслуживания, связанных с задержкой и потерей IP-пакетов;
- обеспечение экономичной модернизации инфокоммуникационной системы при появлении новых технологий и технических средств.

Эти положения – в равной степени – относятся к обеим плоскостям модели ССП (сигнализации и коммутации), рассматриваемой в Приложении 5. Модель сети ССП, как сложной системы, может быть представлена в виде двух компонентов, показанных на рисунке 3.18. Первый компонент – управляющее устройство (УУ). Оно выполняет функции, свойственные системе сигнализации, которые, в свою очередь, определяются задачами управления инфокоммуникационной системой. Второй компонент – объект управления, функции которого выполняют узлы коммутируемой сети.

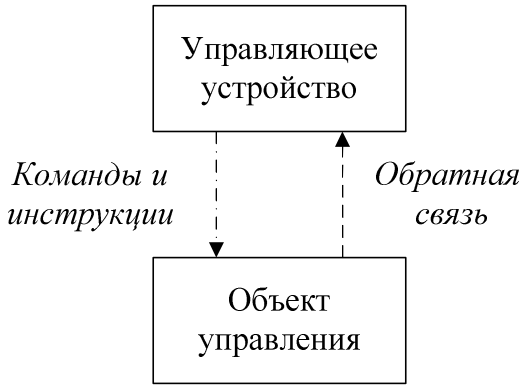


Рисунок 3.18. Два компонента инфокоммуникационной системы

Объект управления получает команды и инструкции из УУ, которое информируется о результатах их выполнения за счет системы обратной связи. Функции УУ в сетях ССП могут выполнять разные аппаратно-программные средства. Исторически первым УУ стал коммутатор Softswitch [52]. С точки зрения вопросов, касающихся выбора структуры коммутируемой сети, перечень функций коммутатора Softswitch не столь существенен. Важно то, что существует некоторая совокупность УУ, определяющая правила работы объектов управления. Можно считать, что функции выполняет совокупность ЦКП (этот термин введен для конкретизации словосочетания "узел коммутации"). Детализированная модель сети ССП, с учетом двух введенных названий, может быть представлена в ином виде – рисунок 3.19. Эта модель позволяет перейти к задаче выбора структуры местной сети. Безусловно, модель такого рода справедлива и для междугородной сети. Она не рассматривалась по той причине, что для междугородной сети задачи размещения ЦКП и УУ решаются элементарно.

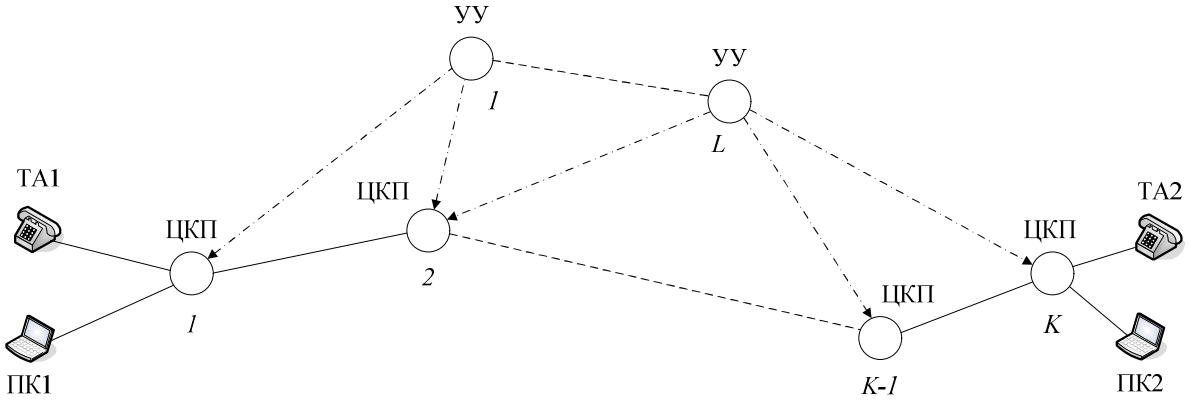


Рисунок 3.19. Детализация модели инфокоммуникационной системы

Предположим, что IP-пакеты между терминалами (ТА1 – ТА2 или ПК1 – ПК2) передаются через K узлов коммутации. Для выбранного маршрута обмена IP-пакетами задействовано L устройств управления. Для каждого ЦКП показан, как минимум, один путь передачи служебной информации от УУ. Не исключено, что для некоторых ЦКП не нужна такая информация. Тогда интенсивность потока служебной информации будет равна нулю. Между смежными УУ также осуществляется обмен служебной информацией. Оборудование каждого УУ располагается вместе с аппаратно-программными средствами одного из ЦКП. Это означает, что количество вершин графа, который служит моделью коммутируемой сети, будет определяться численностью устанавливаемых ЦКП. В этом разделе ЦКП используется как общее понятие для трех видов узлов коммутации, которые в Приложении 5 были названы МАК (мультисервисный абонентский концентратор), ТК (транзитный коммутатор) и МК (магистральный коммутатор).

Задача выбора структуры коммутируемой сети сводится к определению количества ЦКП и УУ, мест размещения, а также схемы организации связи за счет рационального использования транспортных ресурсов. Этой задаче свойственна важная особенность: при ее решении следует ориентироваться на те места размещения аппаратно-программных средств ССП, где в процессе формирования ТФОП устанавливалось оборудование АТС и транзитных узлов. Тот факт, что эти места не всегда были выбраны оптимально, не столь важен для построения ССП. Были выделены земельные участки, построены здания, к ним проложена кабельная канализация. Изменение принятых ранее решений такого характера не представляется возможным по технико-экономическим и организационным причинам.

При построении ССП можно отказаться от части зданий, в которых располагалось оборудование ТФОП, в пользу выносных модулей в контейнерах [53, 54]. Тем не менее, существующая топология кабельной канализации предопределяет выбор мест размещения большей части новых аппаратно-программных средств. Предположим, что к началу построения ССП в телефонной сети насчитывалось M мест размещения оборудования коммутации. Аспекты модернизации сети доступа пока не рассматриваются. В этом случае при переходе к ССП количество таких площадок – N будет выбираться, как правило, с учетом следующего условия: $N \le M$.

На рисунке 3.20 показана модель местной коммутируемой сети для крупного города. Штрихпунктирными линиями обозначены границы трех узловых районов. В каждом из трех районов установлен УИВС, в который включается несколько РАТС. Предполагается, что междугородная связь организована через УИВС. Связи между коммутационными станциями основаны на четких иерархических принципах.

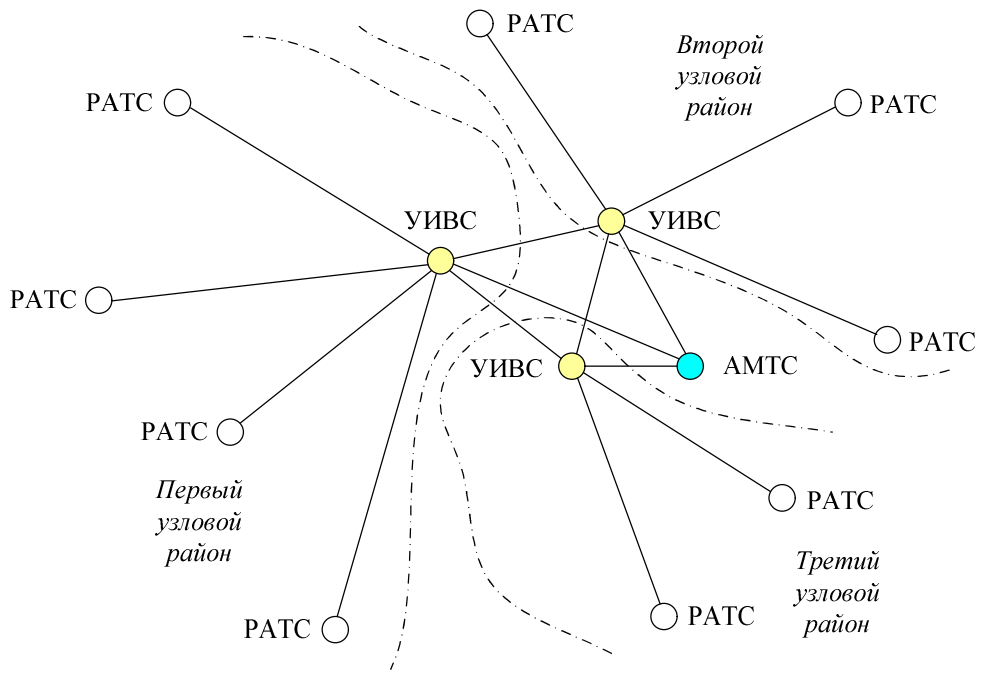


Рисунок 3.20. Модель местной коммутируемой сети

Пример структуры, которая будет сформирована при переходе к ССП, приведен на рисунке 3.21. При выборе модели введено предположение, что $N = M$. АМТС заменена на МК. Вместо РАТС и УИВС предполагается использовать ТК. Причем эти коммутаторы образуют структуру с двумя иерархическими уровнями. Верхний уровень образован тремя ТК с номерами 1, 2 и 3. Коммутаторы нижнего уровня, которые подключаются к этим трем ТК, пронумерованы двумя цифрами. Первая цифра соответствует номеру опорного ТК на верхнем уровне иерархии. Вторая цифра определяет порядковый номер ТК второго иерархического уровня. Для варианта включения ТК31 в МК в качестве первого знака использована цифра "0", а второго – "4".

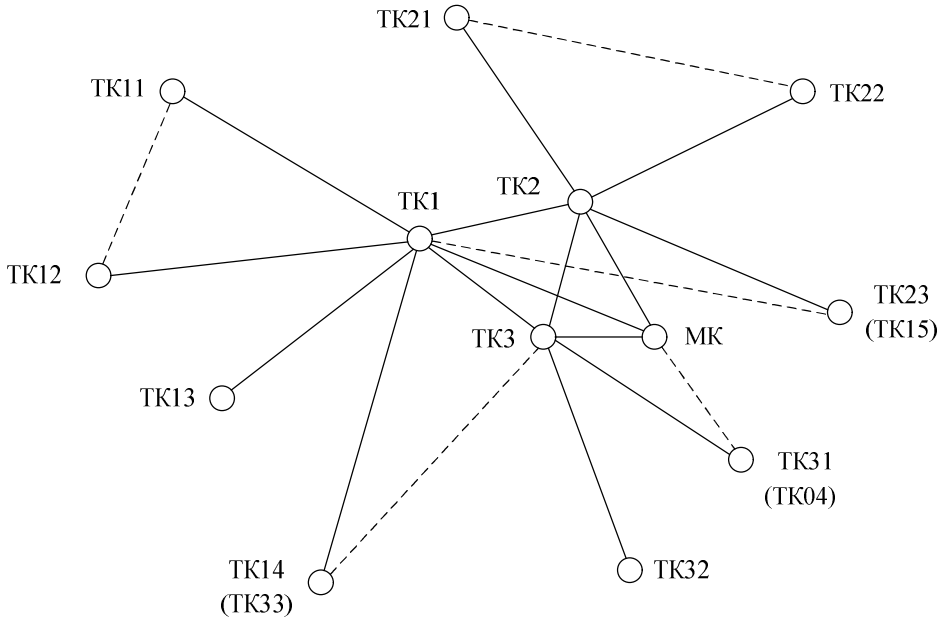


Рисунок 3.21. Модель сети ССП для участка местной связи

При переходе к ССП иерархическая структура сети может быть сохранена. С другой стороны, допускаются связи, показанные на рисунке 3.17 пунктирными линиями, которые

трансформируют модель сети в структуру вида "медуза". В частности, предполагается использование следующих решений:

- связь между ТК второго уровня иерархии;
- включение ТК второго уровня иерархии в два вышестоящих коммутатора (в таких случаях для ТК указывается еще один номер, указанный в скобках);
- соединение ТК второго уровня иерархии непосредственно с МК.

Ряд вышеперечисленных решений определяется на основании оценок стоимости – C_i, которые характеризуют затраты для реализации $i-го$ варианта организации связи. Предположим, что для ТК31 характерен большой объем междугородного трафика. Тогда затраты на традиционный вариант взаимодействия с МК через ТК3 – C_1 возрастают из-за необходимости установки высокопроизводительного оборудования в ТК3. Целесообразно рассмотреть возможность организации прямого тракта обмена IP-пакетами между МК и ТК31. Затраты на этот вариант организации связи равны C_2. Не исключено, что анализ затрат покажет следующее: $C_1 > C_2$. Экономические причины обычно служат основанием и для связи ТК второго уровня иерархии между собой напрямую.

Некоторые из рассматриваемых решений могут быть обусловлены не соотношением между оценками C_i, а требованиями, напрямую касающимися повышения надежности определенных фрагментов сети. Следует напомнить, что ТК нижнего уровня иерархии включены в одно из колец транспортной сети. Такой подход гарантирует высокий уровень коэффициента готовности для транспортных ресурсов, но не обеспечивает надежную работу при отказе ТК первого уровня иерархии. По этой причине в ряде случаев ТК нижнего иерархического уровня целесообразно включать в два опорных коммутатора.

Укрупненный алгоритм выбора структуры коммутируемой сети показан на рисунке 3.22. Он представлен совокупностью простых процедур. Полученное решение, строго говоря, не будет оптимальным. Требования к коммутируемой сети меняются в течение "времени жизни" используемых технических средств. Следовательно, задача поиска оптимальной структуры коммутируемой сети не имеет смысла.

Рисунок 3.22. Укрупненный алгоритм выбора структуры коммутируемой сети

Первый этап предлагаемого алгоритма подразумевает тщательный анализ структуры существующей сети. Модель данной сети представима графом G_{EX}. Нижний индекс образован из двух первых букв слова "существующий" в английском языке – *existing.* На вто-

ром этапе синтезируется граф G_{RAT}. Нижний индекс образован от слова "рациональный" в английском языке – *rational*. Данное решение объясняется тем, что поставленная задача, о чем говорилось в параграфе 1.5.3, сводится к поиску решения, которое следует считать рациональным (устойчивым), а не оптимальным в строгом смысле этого понятия [41]. Тогда условие, сформулированное в начале абзаца, может быть трансформировано следующим образом: G_{RAT} – подграф [55] графа G_{EX}. Выбор мест для размещения устройств управления сетью сводится к поиску нескольких вершин графа G_{RAT}. В соответствующих узлах сети будут располагаться аппаратно-программные средства для выполнения функций управления сетью. Эту задачу можно решить за счет перебора всех возможных вариантов.

Детализированный алгоритм выбора структуры коммутируемой сети показан на рисунке 3.23. При составлении алгоритма не конкретизируются источники информации, на основании которой принимается решение о каких-либо коррекциях. Доступная информация в данном случае рассматривается как внешняя. Кроме того, предполагается, что транспортная сеть в данное время способна обеспечить все необходимые изменения.

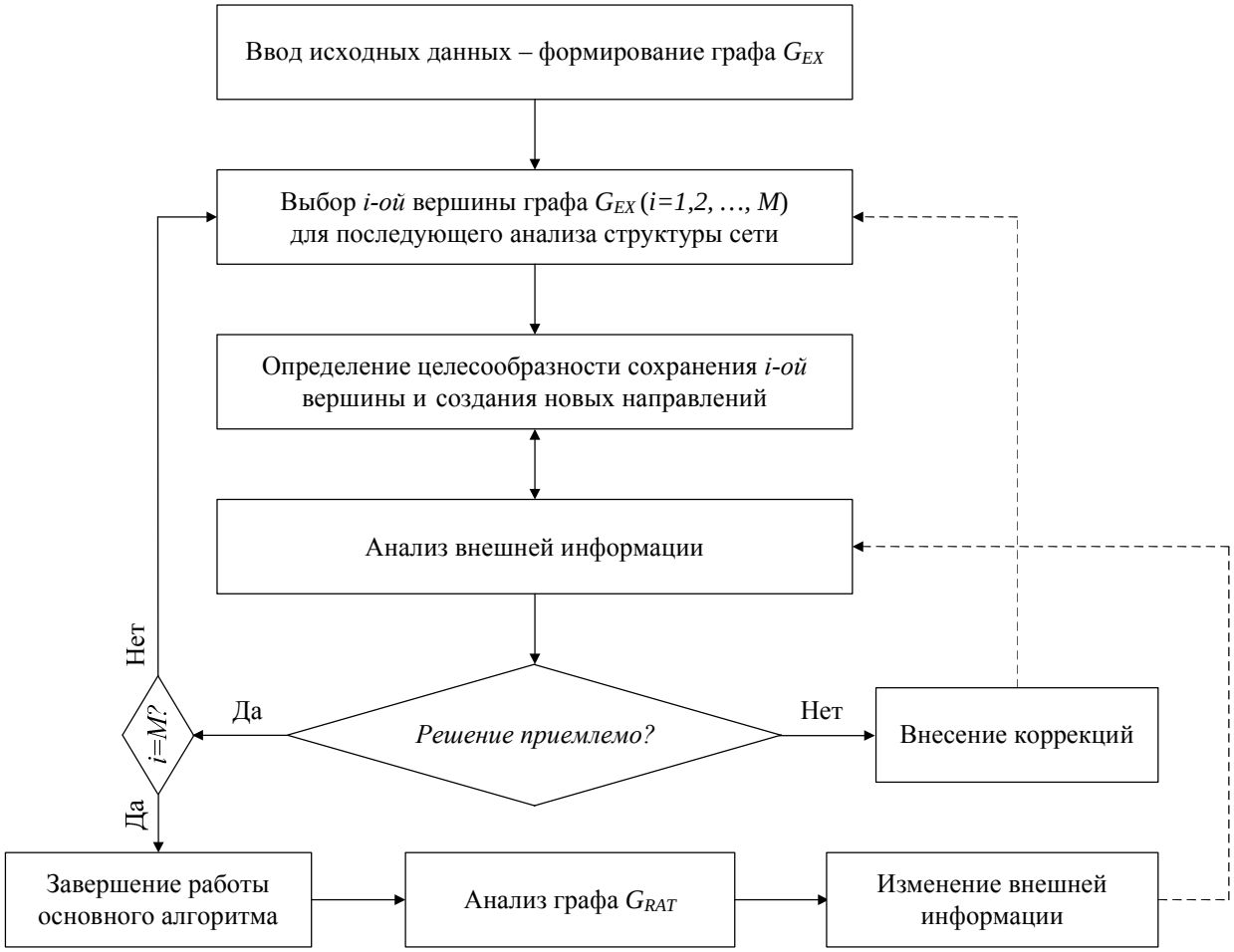


Рисунок 3.23. Детализированный алгоритм выбора структуры коммутируемой сети

Ввод исходных данных позволяет описать все необходимые характеристики сети при помощи графа G_{EX}. Он представляет собой модель, операции с которой направлены на достижение конечной цели – выбор рациональной структуры сети. Ее моделью служит граф G_{RAT}. Далее последовательно выбираются все имеющиеся вершины графа G_{EX} для последующего анализа структуры сети.

Операции с графом G_{EX} можно свести к двум задачам, взаимно связанным между собой. Во-первых, необходимо выбрать величину N, которая, судя по опыту ряда стран,

примерно в два-три раза меньше значения M. Во-вторых, следует определить все виды связи между N вершинами графа G_{RAT}, то есть предложить его рациональную структуру.

Проблемы синтеза структуры крупной коммутируемой сети весьма сложны. Если не ограничить количество всех возможных решений, то придется столкнуться с NP-сложной задачей [56]. Для получения разумных ограничений целесообразно проанализировать возможные и разумные связи для каждого узла коммутации, которые предполагается оставить в составе модернизированной сети. Эмпирические соображения такого рода, основанные на опыте проектировщика, упрощают процесс планирования коммутируемой сети. Причем возникающие ошибки, как правило, могут быть исправлены в условиях эксплуатации коммутируемой сети за счет перераспределения транспортных ресурсов. Эта возможность заложена в современных системах кроссовой коммутации, рассмотренных во второй главе монографии.

Возможность исправления ошибок проектировщика и адаптации коммутируемой сети в условиях эксплуатации при изменяющихся требованиях к инфокоммуникационной системе позволяет использовать сравнительно простые алгоритмы реализации подобных решений [57]. Тем не менее, более перспективным решением следует считать применение тех алгоритмов, которые основаны на нейронных сетях [58] или других когнитивных технологиях [59].

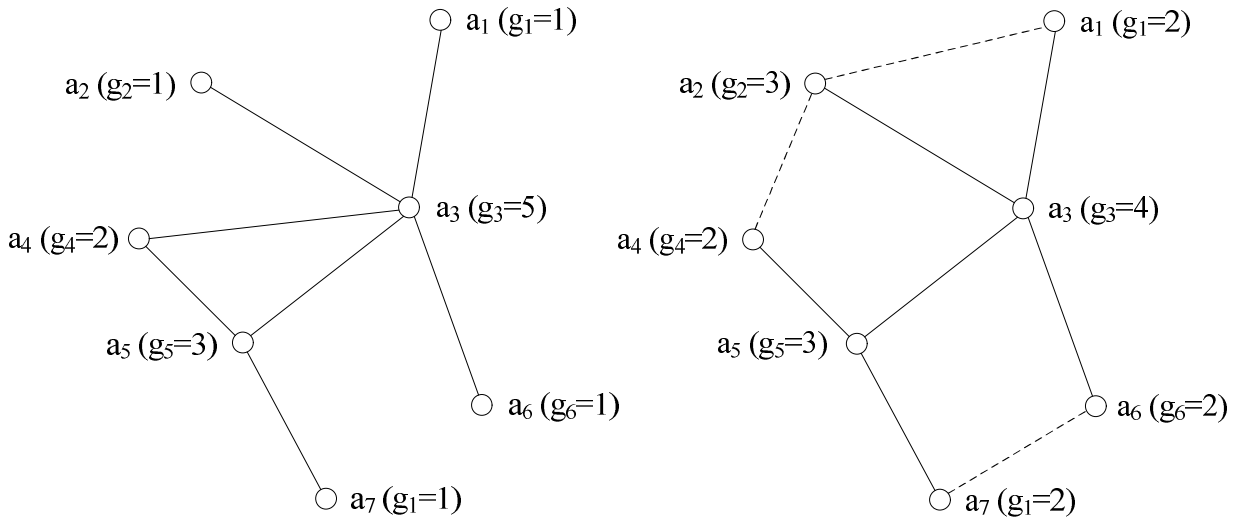
Целесообразность сохранения $i-ой$ вершины в составе модернизируемой сети можно сформулировать как формализованную задачу. Известно количество вершин графа G_{EX}. Для каждой $i-ой$ вершины задана ее стоимость – $C_{EX}(i)$ $\left(i=\overline{1,M}\right)$. Известны величины стоимости всех вершин графа G_{RAT} – $C_{RAT}(j)$ для $\left(j=\overline{1,N}\right)$. Требуется найти такое N, для которого сумма возможных значений $C_{RAT}(j)$ становится минимальной. С теоретических позиций подобная постановка задачи вполне правомерна. Более того, известно несколько способов решения данной задачи [28, 41, 60]. С практической точки зрения поставленную задачу следует отнести к плохо формализуемым [61].

Определение целесообразности сохранения $i-ой$ вершины в составе графа G_{RAT} целесообразно осуществлять на основе опыта проектировщика. Для минимизации ошибок необходимо предоставить всю имеющуюся информацию, касающуюся планов застройки территорий, расположенных рядом со зданием, где размещается эксплуатируемый узел коммутации, экономических факторов (в первую очередь – стоимость недвижимости и земли рядом с гражданскими сооружениями Оператора связи) и другие сведения. Именно с этой целью в состав алгоритма введен блок "Анализ внешней информации". Он связан с расположенным выше блоком двунаправленной стрелкой, которая подчеркивает тот факт, что соответствующие процессы следует рассматривать совместно. Безусловно, полезны уже известные оценки, полученные при модернизации коммутируемых сетей в развитых странах. В частности, при цифровизации телефонной сети канадского города Торонто количество коммутационных станций снизилось с 67 в 1990 году до 38 в 1993 году [62]. При переводе итальянской междугородной телефонной сети на технологию VoIP вместо 66 транзитных узлов с коммутацией каналов было решено установить 24 ЦКП [63].

Задачу, связанную с созданием новых направлений, целесообразно рассматривать как минимизацию количества иерархий в составе национальной коммутируемой сети. При переходе к сети местной связи целесообразно ориентироваться на постепенный переход к структурам, близким к полносвязному графу. Тогда цель создания новых направлений можно трактовать как минимизацию коэффициента вариации степени вершин графа или диапазона изменения (размаха) этой величины.

Для пояснения такой постановки задачи целесообразно использовать модель сети в виде графа с семью вершинами. В левой части рисунка 3.24 показана структура сети, которая образуется после выбора величины N. Она, по условию задачи, равна семи. Для каждой вершины в скобках указана ее степень – g_i. Как видно из приведенной модели, в

начале модернизации сети степень вершины графа меняется от единицы до пяти. После завершения процесса модернизации этот диапазон сужается. Все вершины графа имеют степень от двух до четырех. Коэффициент вариации исследуемой величины снизился с 0,76 до 0,31.



а) Модель сети в начале модернизации б) Модель сети после модернизации

Рисунок 3.24. Минимизация дисперсии степени вершин графа

Ликвидация ребра между вершинами a_3 и a_4 не означает, что демонтируется линия связи. Происходит перераспределение транспортных ресурсов за счет организации новых полупостоянных соединений в оборудовании СУ, которое расположено в вершинах a_3 и a_4. Такая процедура обычно становится эффективной, если трафик между точками a_3 и a_4 снижается до некого порога, который определяет целесообразность прямых связей между узлами коммутации.

Вернемся к блоку "Анализ внешней информации" на рисунке 3.23. Выполнение ряда операций, входящих в этот блок, может существенно изменить структуру сети, которая представляется весьма удачной с технической точки зрения. В некоторых случаях после анализа доступной информации необходим диалог между ЛОР и ЛПР.

Результаты анализа внешней информации (включая, при необходимости, выводы из диалога ЛОР и ЛПР) позволяют ответить на вопрос о приемлемости решения. Если ответ будет положительный, то следует перейти к анализу следующей вершины графа. Когда работа со всеми вершинами графа завершена, необходимо провести анализ результата в целом. Этот значит, что объектом исследования становится граф G_{RAT} в его финальной стадии. Если ответ на вопрос о приемлемости решения будет отрицательным, то следует внести необходимые коррекции и вернуться во второй сверху блок алгоритма.

Анализ графа G_{RAT} осуществляется ЛПР. После одобрения проекта сведения о графе G_{RAT} отображаются в блоке "Изменение внешней информации". Подразумевается, что в этом блоке накапливается информация, позволяющая судить об эффективности решений проектировщика. Возникающие ошибки должны передаваться в блок "Анализ внешней информации" для принятия решений об изменении структуры сети. Кроме того, в этот блок могут поступать сведения о необходимости оперативной реконфигурации сети при возникновении каких-либо нештатных ситуаций. Процедуры реконфигурации могут быть использованы только в том случае, если рассматриваемый алгоритм применяется как для проектирования сети, так и для ее технической эксплуатации.

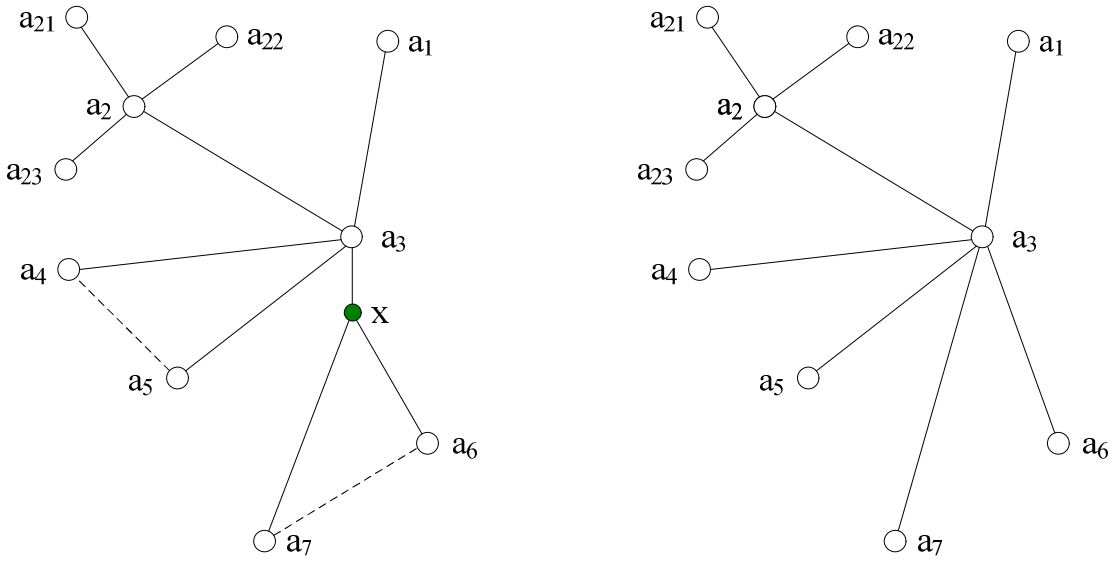
3.3.3. Сценарии модернизации сетей доступа

Принципы развития коммутируемых сетей определяются сценариями модернизации сетей доступа. При выборе оптимального сценария (или их совокупности) учитываются многие соображения. Целесообразно обратить внимание на такие моменты:

- предпочтительные технологии передачи и коммутации с точки зрения услуг, предоставляемых тем пользователям, которые приносят Оператору основные доходы;
- перспективные требования к надежности инфокоммуникационной системы, предъявляемые разными группами пользователей;
- возможность конкуренции и взаимного дополнения различных видов доступа (проводных и беспроводных).

Все сценарии модернизации сетей доступа, рассматриваемые в этом параграфе, инвариантны к технологии передачи и коммутации. По этой причине при формировании принципов модернизации сетей доступа, эксплуатируемых в составе ТФОП, основное внимание уделяется двум моментам: обеспечению требуемой надежности и технологиям.

Сеть доступа, построенную для поддержки услуг ТФОП, можно анализировать при помощи модели, которая приведена на рисунке 3.25. Эта модель включает два графа, которые отображают структуры транспортной и коммутируемой сетей.



а) Модель транспортной сети доступа до модернизации

б) Модель коммутируемой сети доступа до модернизации

Рисунок 3.25. Сеть доступа, созданная для поддержки услуг ТФОП

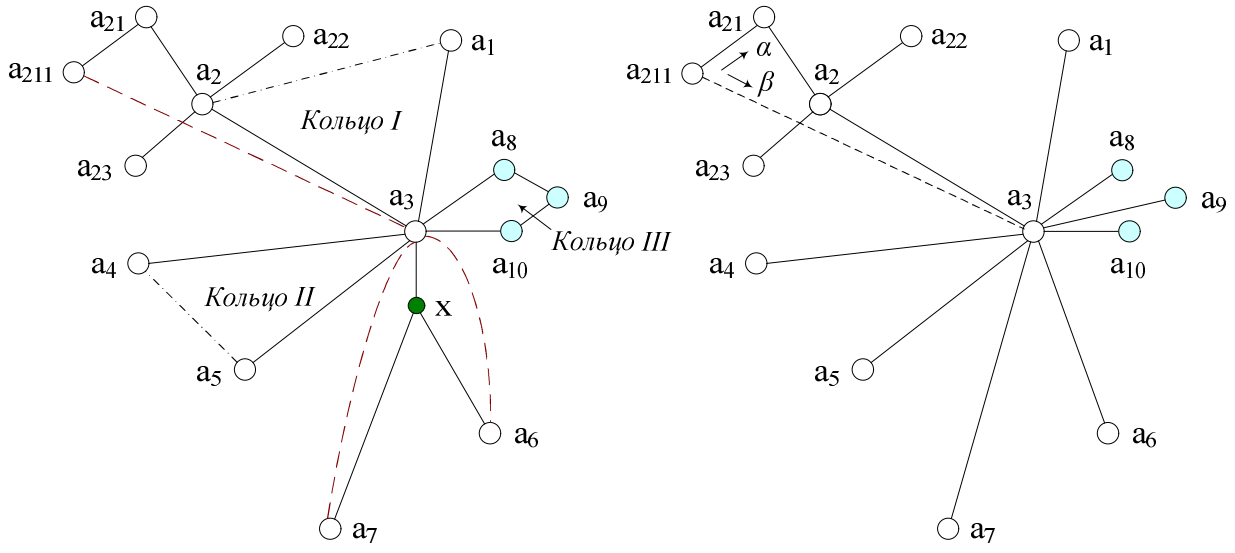
Вершина a_3 для модели транспортной сети соответствует СУ, который расположен в помещении коммутационной станции ГТС или СТС. В составе ГТС или СТС вершина a_3 определяет место размещения коммутационной станции. Вершины a_1 и a_2, также $a_4 - a_7$ в модели транспортной сети указывают на точки расположения ШР. Для модели (б) эти же вершины можно рассматривать как места, в которых, при необходимости, будут установлены средства коммутации (распределения информации), используемые в сетях доступа. Для вершины a_2 показана модель распределительного участка сети доступа. В ее состав входят вершины a_{21}, a_{22} и a_{23}. Они определяют места размещения РК.

Вершина, обозначенная в модели (б) как точка "X", определяет участок кабельной канализации, до которого магистральные кабели на участках $a_3 - a_6$ и $a_3 - a_7$ проложены вместе. Пунктирными линиями изображены направления межшкафной связи. Они могут

быть использованы для организации кольцевых структур в составе перспективных сетей доступа.

Модель (а) представляет собой граф произвольной структуры. Правда, в нем всегда доминирует древовидная топология. Модель (б) для сети доступа в эксплуатируемых ГТС и СТС всегда соответствует структуре "дерево". Если процесс модернизации сети доступа ограничить усилиями, направленными на повышение скорости обмена информацией, то проблемы обеспечения надежности останутся нерешенными задачами. Хорошо известно, что надежность сетей, основанных на древовидной топологии, очень низкая [3, 56]. Это значит, что при разработке сценариев модернизации сетей доступа следует учитывать необходимость повышения надежности связи между СУ (вершина a_3) и всеми другими узлами (вершины a_1, a_2, a_4 – a_7). Следует помнить, что решение данной задачи повысит коэффициент готовности на участках a_3 – a_i (здесь $i = 1, 2, \overline{4-7}$), но не гарантирует рост надежности подключения терминального оборудования к сети электросвязи.

Сценарии модернизации сети доступа должны разрабатываться с учетом факторов, перечисленных выше. Пример такого сценария (он может считаться типичным) показан на рисунке 3.26. Как и в исходной модели, которая была приведена на рисунке 3.25, раздельно рассматриваются структуры транспортной и коммутируемых сетей.



а) Модель транспортной сети доступа после модернизации

б) Модель коммутируемой сети доступа после модернизации

Рисунок 3.26. Типичный сценарий эволюции сети доступа

Анализируемый сценарий основан на трех важных изменениях в транспортной сети. Они направлены на повышение пропускной способности транспортных ресурсов, а также на решение ряда задач по обеспечению высокой надежности инфокоммуникационной системы.

Первое изменение заключается в создание колец за счет построения линий передачи между двумя парами узлов: a_1 – a_2 и a_4 – a_5. Эти кольца пронумерованы римскими цифрами. В результате формируется надежная структура сети доступа на магистральном участке. Распределительный участок, как и ранее, базируется на древовидной топологии.

Второе изменение касается организации связи в границах ЗПП. Для некоторых групп пользователей двухпроводные цепи, применяемые для подключения терминалов в ЗПП, в обозримой перспективе уже не будут способны обеспечить необходимую скорость обмена информацией. В этом случае целесообразно строить кольца. Такое решение показано в левой части рисунка 3.26 для новых вершин a_8, a_9 и a_{10}. Новому кольцу присвоен номер III.

Третье изменение следует рассматривать как использование средств беспроводного доступа в качестве *дополнения* к модернизируемым транспортным ресурсам, основанным на применении кабельных линий. Решения подобного рода эффективны, по крайней мере, в двух случаях. Во-первых, средства беспроводного доступа позволяют резервировать транспортные ресурсы для узлов a_6 и a_7. Во-вторых, за счет оборудования беспроводного доступа можно обеспечить надежное подключение терминала пользователя. На рисунке он показан в виде вершины a_{211}. Аспекты оценки надежности такого решения и расчета необходимых ресурсов изложены в параграфах 2.2.3 и 2.3.8 второй главы монографии.

С точки зрения модели, которая показана в правой части рисунка 3.26, изменения на уровне магистральных участков не происходят. *Логически* структура коммутируемой сети на магистральном участке не меняется. Она остается древовидной, но величины, которые характеризуют коэффициенты готовности и пропускную способность, возрастают. Для терминального оборудования, которому могут быть выделены транспортные ресурсы за счет средств беспроводного доступа, ситуация меняется. Можно считать, что для таких терминалов существует два пути связи с инфокоммуникационной системой. Основной (он на рисунке 3.26 представлен как маршрут α) используется до наступления отказа в сети доступа, построенной за счет кабельных линий связи. После выявления отказа и до его устранения используется резервный путь. Он обозначен как маршрут β.

Некоторые сценарии доступа предполагают использование только беспроводных и даже исключительно мобильных технологий. Эти виды технологий доступа постоянно совершенствуются [26, 64]. Тем не менее, полный отказ от применения кабелей связи в сетях доступа вряд ли можно рассматривать как практически значимое решение. Среди компромиссных сценариев применения проводных и беспроводных технологий следует выделить новое направление, известное по аббревиатуре FiWi (Fiber-Wireless). Пример реализации концепции FiWi показан на рисунке 3.27. Анализируемая модель основана на публикациях [65, 66].

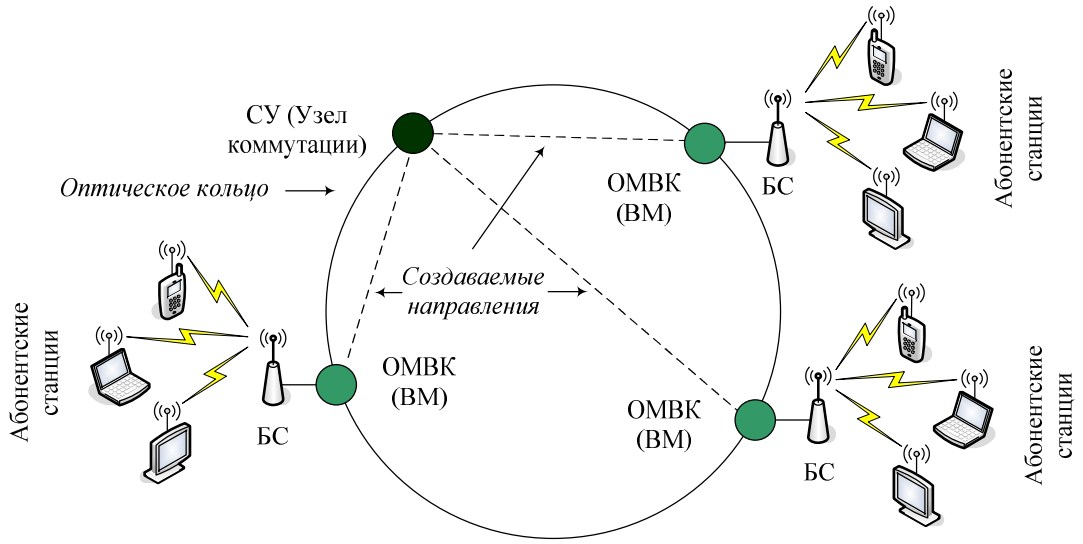


Рисунок 3.27. Структура сети доступа, построенной на основе концепции FiWi

Модель транспортной сети состоит из СУ, который связан с тремя ОМВК за счет прокладки оптического кольца. В одном помещении с СУ расположен узел коммутации. Рядом с каждым ОМВК находится ВМ. Узел коммутации и совокупность ВМ образуют коммутируемую сеть, построенную на базе звездообразной топологии. Каждый из трех ВМ включает в свой состав оборудование БС. Задача БС – обеспечить транспортными ресурсами терминальное оборудование пользователей. На рисунке всем видам терминалов соответствует общее название – "Абонентская станция". Такая терминология принята в концепции FiWi.

В качестве альтернативного сценария эволюции сетей доступа можно выделить концепцию 2Э [67]. Название "2Э" образовано из первых букв двух технических систем: *электроэнергетики* и *электросвязи*. Все решения, предложенные в [67] базируются на трех процессах: интеграции, конвергенции и консолидации [1].

Типичный пример интеграции и консолидации в прошлом можно найти в [68, 69]. Эксплуатация линейных сооружений составляет весомую долю в издержках Оператора сети. Чтобы обеспечить экономически выгодные условия работы Оператора связи в сельской местности в США был принят закон, который предусматривал выдачу лицензии на снабжение электрической энергией предприятий и населения только той компании, которая бесплатно (!) брала на себя функции по обслуживанию воздушных линий СТС.

Сценарии модернизации сети электросвязи далее рассматриваются для системы сельской электросвязи, так именно там можно рассчитывать на максимальный эффект с технической и экономической точек зрения. Тем не менее, методологически нет никакой принципиальной разницы в реализации концепции 2Э между городами и сельскими районами. Речь в любом случае идет об использовании линейных сооружений, которые содержат металлические проводники для подачи электроэнергии и оптические волокна, предназначенные для обмена информацией в сетях электросвязи. Часть волокон или трактов, образованных при их уплотнении, будет использована электроэнергетическими компаниями в своих целях, а по двум (или более) проводникам возможна организация системы электропитания оборудования электросвязи.

Можно выделить несколько сценариев модернизации сети электросвязи на базе концепции 2Э. Их целесообразно объединить в типовые решения, изображенные на рисунке 3.28. Предлагаемая модель не включает ряд компонентов обеих систем, которые не столь существенны для дальнейшего анализа.

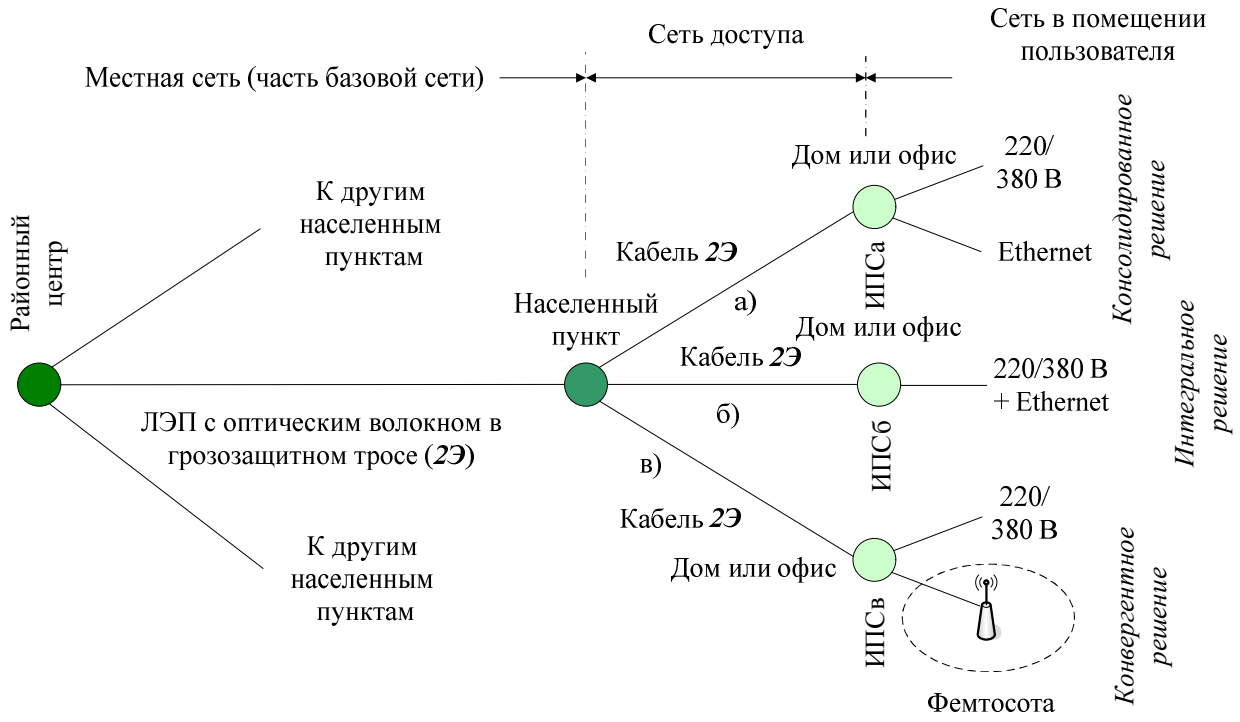


Рисунок 3.28. Сценарии модернизации сети электросвязи на базе концепции 2Э

Предполагается, что линия электропередачи (ЛЭП) между районным центром и населенным пунктом содержит грозозащитный трос, в котором располагаются оптические волокна. Такие решения уже используются на практике. Данный фрагмент сети, строго говоря, не входит в состав сети доступа.

В границах населенного пункта используется новый тип кабеля, который должен быть разработан по техническим требованиям, сформулированным в процессе создания концепции 2Э. Этот кабель содержит под одной оболочкой линии 220/380 В и оптические

волокна. Между центром населенного пункта и домами или офисами показаны три направления прокладки кабеля. Эти направления иллюстрируют сценарии (а), (б) и (в), которые могут быть реализованы на основе концепции 2Э. Для каждого из этих сценариев используется свой ИПС.

Сценарий (а) может служить примером консолидированного решения. Для данного сценария используется интерфейс, который обозначен как ИПСа. Этот интерфейс весьма прост. Он предусматривает блок, в котором осуществляется разделение металлических проводников и оптического волокна. Металлические проводники используются для подачи в дом или офис напряжения 220/380 В. Никакой пересмотр действующих норм и правил, по всей видимости, не потребуется. Оптическое волокно формирует интерфейс в соответствии с принятым стандартом. В качестве примера далее показан интерфейс на основе стандарта Ethernet [50].

Сценарий (б) предусматривает разработку более сложного интерфейса. На рисунке 3.28 он обозначен как ИПСб. Данный интерфейс иллюстрирует пример интегрального решения. Он может быть реализован разными способами, но суть остается неизменной: в доме или в офисе также прокладывается кабель класса 2Э. При этом можно выделить, по крайней мере, два радикально различающихся варианта:

- вся абонентская проводка строится за счет использования только медных проводников с использованием технологии PLC (*power line communication*), которая обеспечивает передачу всех видов информации по сравнительно коротких цепям с напряжением 220/380 В;
- до части розеток нового типа доводятся как линии 220/380 В, так и шина Ethernet, что потребует разработки комбинированных вилок, которые могут оказаться весьма эффективным средством реализации концепции "Умный дом" [70].

Сценарий (в) – типичный пример конвергентного решения. Интерфейс класса ИПСв направляет оптическое волокно в оборудование широкополосного беспроводного доступа. При помощи этого оборудования формируется фемтосота, обеспечивающая функции по подключению всех терминалов, которые расположены в доме или в офисе. Процессы конвергенции проявляются в данном сценарии двояко. Во-первых, напряжение 220/380 В используется для электропитания оборудования беспроводного доступа, а также терминалов. В свою очередь, ресурсы беспроводного доступа могут быть задействованы в системе контроля сети 220/380 В.

Можно разработать еще ряд сценариев, представляющих собой разновидности тех решений, которые показаны на рисунке 3.28. Кроме того, можно предложить несколько вариантов по реализации каждого сценария. Требуют исследования аспекты надежности и живучести решений, предусматриваемых предлагаемой концепцией. Подобные вопросы – предмет отдельного исследования.

Совместное развитие систем связи и электроэнергетики представляется весьма эффективным решением, которое можно отнести к классу синергетических [71]. Следует подчеркнуть, что основные положения, касающиеся концепции 2Э, еще только начинают формироваться. Необходима серьезная исследовательская работа по изучению различных аспектов, касающихся данного пути развития сетей доступа. Следует также учесть, что концепция 2Э требует ревизии принципов модернизации сети в помещении пользователя.

Монография практически не содержит информации по конкретным технологиям, но в данном параграфе целесообразно кратко остановиться на применении полиэфирного волокна [72]. Существенная доля инвестиций для технологий класса FTTx приходится на последние сотни метров, когда надо прокладывать кабель по подвалам, чердакам или иным сложным объектам. На этих участках стали применяться кабели с полиэфирным волокном. Это волокно имеет сравнительно больший диаметр: от 0,5 до 1,0 мм. Стоимость трансиверов достигла уровня 2 – 4 евро к моменту выхода статьи [72]. Пропускная способность полиэфирного волокна составляет не менее 100 Мбит/с, что заметно превышает скорость обмена данными при помощи большинства xDSL соединений.

3.3.4. Численные оценки сценариев развития коммутируемых сетей

В этом параграфе приводятся численные оценки, касающиеся трех важных аспектов развития коммутируемых сетей. В-первых, интересен анализ всех сценариев эволюции коммутируемых сетей, которые определяются основными стратегиями развития системы электросвязи. Эти стратегии были приведены на рисунке 3.10. Анализ такого рода должен базироваться на простых количественных соотношениях, позволяющих получить оценки, которые необходимы Оператору для выбора путей развития инфокоммуникационной системы в целом. Во-вторых, практическую ценность представляют численные оценки, которые позволяют установить приоритетные направления каждой стратегии эволюции коммутируемых сетей. Приоритеты могут назначаться как фрагментам системы связи (в частности, магистральному участку сети доступа), так и типам оборудования (например, узлам коммутации). В-третьих, важны стоимостные оценки, позволяющие рассчитать хотя бы порядок необходимых инвестиций.

Анализ возможных стратегий Оператора можно выполнить за счет использования разных экономико-математических методов. Во второй главе монографии акцентируется внимание на использовании *метода Делфи* [73]. Ему свойственен ряд объективных и субъективных недостатков, но в настоящее время сложно предложить более эффективный подход к выбору альтернатив. В статье [74] приведены результаты опроса Операторов связи относительно предпочтительного выбора стратегии модернизации системы связи. Полученные ответы свидетельствуют о выборе прагматического подхода перехода к ССП большинством Операторов связи.

Численная оценка такого предпочтения может быть выражена через математическое ожидание риска $j-го$ сценария, входящего в $i-ую$ стратегию – $R_i^{(1)}(j)$. Дополнением этой оценки может служить коэффициент вариации – $v_i(j)$, определяющий разброс всех оценок, которые были получены методом Делфи. Таким образом, речь идет о некой паре $R_i^{(1)}(j)$ и $v_i(j)$, позволяющей судить об эффективности $j-го$ сценария модернизации коммутируемой сети. В таблице П5.1 были приведены оценки для стратегий построения ССП без выделения различных сценариев. По этой причине переменная j в таблице не фигурирует. Выбор наилучшего сценария осуществляется по методике, предложенной в Приложении 5, но количество анализируемых ответов увеличивается пропорционально величине j.

Для оценки сценариев следует предварительно выбрать максимальное значение коэффициента вариации – v_i^{max}, которое будет считаться приемлемым для всех сценариев, относящихся к $i-ой$ стратегии. В некоторых случаях существуют аргументированные соображения, позволяющие установить величину v_i^{max}. Часто таких оснований нет. Тогда, судя по результатам оценки мнений Операторов связи о переходе к ССП [74], можно считать, что $v_i^{max} = 0,5$. В этом случае в качестве численной оценки $j-го$ сценария, для которого $v_i(j) \le v_i^{max}$, будет служить среднее значение величины риска $R_i^{(1)}(j)$. Очевидно, что предпочтение следует отдать сценарию с минимальным риском. Правда, подобный критерий нельзя использовать для принятия решения по выбору сценария модернизации коммутируемой сети. Величину $R_i^{(1)}(j)$ следует рассматривать как один из показателей, входящий в совокупность атрибутов, которые характеризуют анализируемый сценарий.

Сценарии модернизации коммутируемой сети могут заметно различаться по ряду важных показателей. В этом случае численной оценкой $j-го$ сценария может служить площадь многоугольника $S_i(j)$. Многоугольник образуется за счет соединения вершин, отражающих балльные оценки для выбранных показателей коммутируемой сети [36]. Все оценки должны находиться в диапазоне от нуля (минимум) до единицы (максимум). Чем выше балльная оценка, тем лучше рассматриваемый показатель.

На рисунке 3.29 показан пример построения многоугольников для двух сценариев модернизации коммутируемой телефонной сети. Выбрано пять ключевых показателей, позволяющих сравнить оба предлагаемых решения. Пунктирной линией показан некий идеализированный сценарий, для которого всем показателям присвоена максимальная оценка.

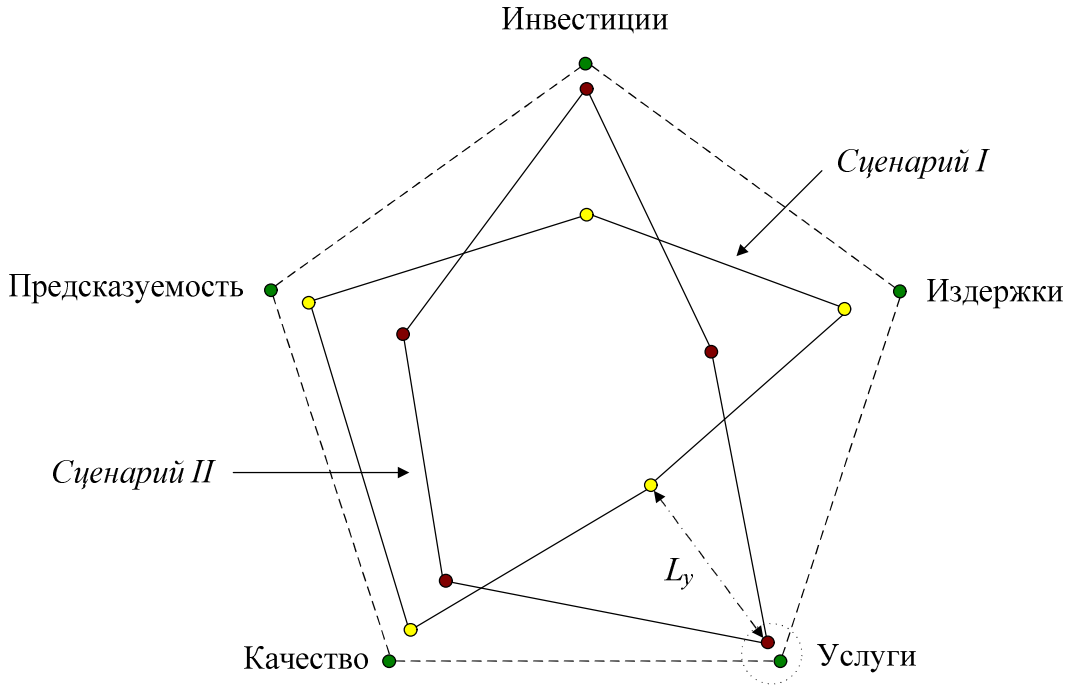


Рисунок 3.29. Балльные оценки для двух сценариев модернизации коммутируемой сети

Допустим, что сценарий I, который реализуется на основании первой стратегии, не предусматривает радикальные меры по модернизации коммутируемой сети. Примером такого сценария может служить развитие телефонной сети с коммутацией каналов с предоставлением пользователям возможности подключения оборудования xDSL. В этом случае можно ожидать следующий характер изменения пяти ключевых показателей:

- инвестиции, по всей видимости, не будут значительными по сравнению с другими сценариями;
- издержки (эксплуатационные расходы) останутся существенной статьей в суммарных затратах Оператора связи;
- перечень услуг, предоставляемых абонентам, не будет столь внушительным как при переходе к ССП [75, 76];
- качество обслуживания для трафика речи останется высоким, что характерно для технологии коммутации каналов;
- предсказуемость поведения коммутируемой сети останется приемлемой, так как для обслуживания трафика речи и данных будут использоваться разные транспортные ресурсы.

Предположим, что сценарий II, относящийся к третьей стратегии, базируется на концепции ССП [75, 76]. Тогда для анализируемых ключевых показателей можно ожидать такие изменения:

- инвестиции заметно возрастут по сравнению со сценариями, для реализации которых не требуется радикальная модернизация эксплуатируемых сетей;
- издержки могут быть существенно сокращены благодаря интеграции почти всех коммутируемых сетей;
- перечень услуг, предоставляемых абонентам, будет представлен почти всеми известными видами обслуживания;

- качество обслуживания (для трафика речи) может немного снизиться из-за особенностей пакетных технологий;
- предсказуемость поведения сети также может снизиться вследствие сложного характера трафика, обслуживаемого ССП.

Для каждого пятиугольника на основании геометрических соотношений надо найти площадь. В результате получатся две оценки – $S_1(I)$ и $S_3(II)$. Предпочтение следует отдать тому сценарию, для которого площадь пятиугольника больше. Это предпочтение не может рассматриваться как основание для окончательного принятия решения. Более сложные методы обработки величин вида $S_1(I)$ и $S_3(II)$ приведены в параграфе 1.4.6.

На рисунке 3.29 пунктирным кружком выделен показатель "Услуги". Очевидно, что именно этому показателю чаще всего будет присвоен приоритет, о котором говорилось в начале параграфа 3.3.4. Тогда оценки $S_1(I)$ и $S_3(II)$ следует изменить. Эту процедуру можно выполнить, например, присвоив величине L_y большее значение. Оно может быть задано после получения экспертных оценок.

Полезный способ получения численных оценок для сравнения разных сценариев модернизации коммутируемой сети основан на анализе уже упоминавшихся кривых NPV. На рисунке 3.30 приведены функции $NPV_j(t)$ для трех гипотетических сценариев модернизации коммутируемой сети. Все кривые приведены в виде ломаных линий для упрощения их характера, что не меняет сущности анализируемых сценариев.

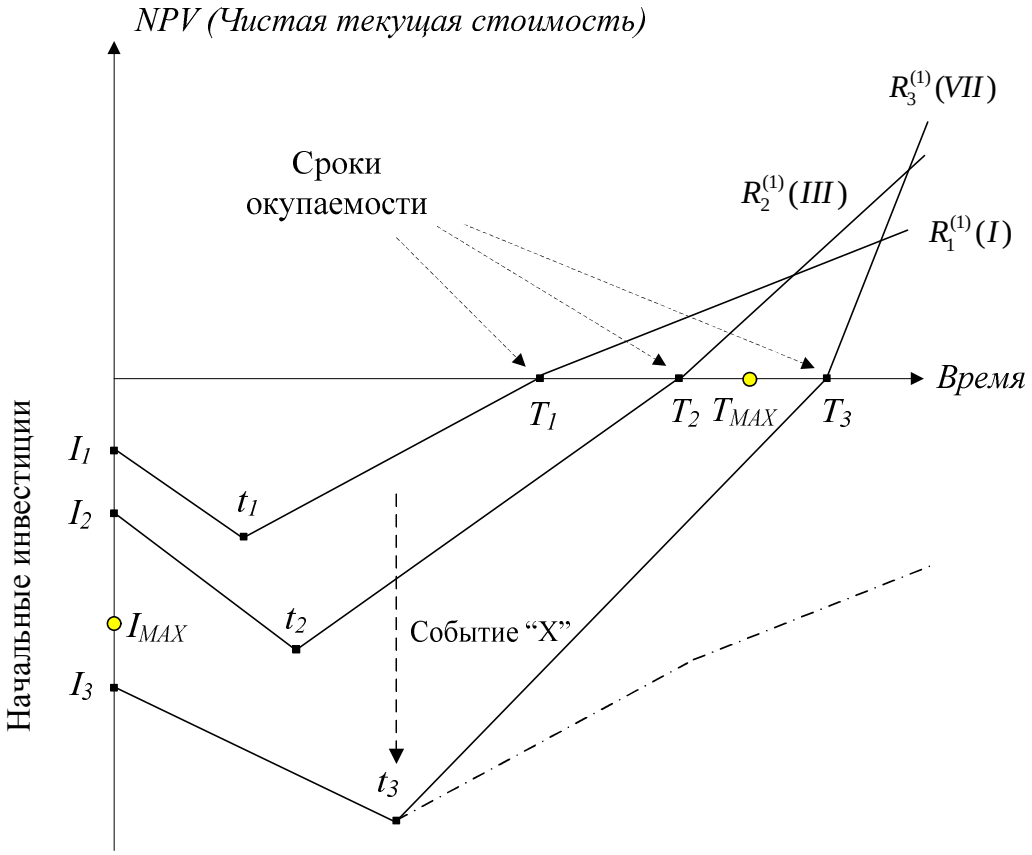


Рисунок 3.30. Кривые $NPV_j(t)$ для трех сценариев модернизации коммутируемой сети

Нижние индексы при переменных, показанных на рисунке 3.30, определяют тот тип стратегии модернизации коммутируемой сети, к которому относится один из сценариев. Для каждой стратегии рассматривается только один сценарий. Ему присвоен номер в виде одной из римских цифр: I, III или VII. Срок окупаемости определяется точкой на оси "Время", после которой функция $NPV_j(t)$ становится положительной. Для этих точек ука-

зан только номер стратегии модернизации коммутируемой сети. Такая же нумерация принята для точек на оси "Время", в которых функции $NPV_j(t)$ перестают убывать, и для начальных инвестиций.

Предположим, что Оператор связи собирается строить телекоммуникационную сеть для обслуживания абонентов, заселяющих новый микрорайон в черте города. Допустим, что в результате разработки технического задания принято решение о целесообразности детального изучения трех стратегий построения инфокоммуникационной системы:

- 1. Создается только цифровая сеть с коммутацией каналов для предоставления, в основном, услуг телефонной связи.
- 2. Строится цифровая сеть с коммутацией каналов, обеспечивающая также услуги широкополосного доступа за счет установки дополнительного оборудования в кроссах коммутационной станции и в выносных концентраторах.
- 3. Реализуется проект сети следующего поколения, которая ориентирована на услуги обмена информацией в трех основных формах – речь, данные и видео.

Несомненно, для начальных инвестиций справедливо такое условие: $I_3 > I_2 > I_1$. Сроки реализации проектов, как правило, будут таковы, что моменты подключения потенциальных абонентов (и, следовательно, получения доходов) представимы при помощи такого неравенства: $t_1 < t_2 < t_3$. Соотношение между сроками окупаемости вида $T_3 > T_2 > T_1$ выбрано условно. Тем не менее, оно представляется вполне логичным с учетом действующих тарифных планов и объемов соответствующих рынков.

До анализа кривых $NPV_j(t)$ и рисков $R_1^{(1)}(I)$, $R_2^{(1)}(III)$ и $R_3^{(1)}(VII)$, свойственных каждому из трех сценариев, целесообразно рассмотреть все возможные ограничения на реализацию проекта. На осях абсцисс и ординат отмечены два ограничения. Во-первых, существует максимальный объем начальных инвестиций – I_{MAX}, который может быть выделен для построения сети. Поскольку $I_3 > I_{MAX}$, седьмой сценарий реализации проекта следует исключить из дальнейшего анализа. Во-вторых, определяется максимальный срок окупаемости – T_{MAX}. Для приведенного примера $T_3 > T_{MAX}$. Это означает, что анализ седьмого сценария – даже если $I_3 \le I_{MAX}$ – не имеет практического смысла.

Выбор оптимального сценария можно представить как процесс принятия решений [77] на основе ожидаемых величин $NPV_j(t)$ и значений риска [78]. Для рассматриваемого примера влияние риска представлено событием "X". Данное событие заключается в следующем:

- Оператор, ожидая в перспективе большие доходы, реализует седьмой сценарий построения инфокоммуникационной системы;
- до завершения процесса построения инфокоммуникационной системы, которая основана на идеологии ССП, конкурирующая компания кабельного телевидения предоставила потенциальным абонентам возможность широкополосного доступа в Internet и современные видеоуслуги;
- Оператору фактически остается рынок услуг телефонной связи, для выхода на который он создал сеть с более существенными функциональными возможностями, инвестировав значительные средства.

В таком случае, как показывает стрелка, направленная вниз, ход кривой $NPV_{VII}(t)$ может стать таким же, как и для первого сценария. Соответствующий фрагмент функции $NPV_{VII}(t)$ показан штрихпунктирной линией после точки t_3. Срок окупаемости проекта может превзойти приемлемый уровень. Такая ситуация, названная событием "X", неразрывно связана с риском.

Стоимостные оценки сценариев модернизации коммутируемых сетей могут быть получены разными способами. Для сравнения сценариев можно использовать подход, основанный на расчетах, в которые оперируют денежными единицами [79]. В литературе на

английском языке денежные единицы известны как *monetary unit*. Анализ, основанный на вычислении стоимости в денежных единицах, используется в ряде справочников МСЭ. Этот экономико-математический метод позволяет определить предпочтение, но не дает оценки стоимости. В работе [79] приведен такой набор для стоимости линейных трактов ЦСП длиной в один километр:

- 6 Мбит/с – 1 денежная единица;
- 45 Мбит/с – 4 денежных единицы;
- 150 Мбит/с – 9 денежных единиц.

Отношения скоростей образуют такой ряд: 1,0 – 7,5 – 25,0. Цены, выраженные в денежных единицах, формируют ряд следующего вида: 1,0 – 4,0 – 9,0. Если необходимо построить линейный тракт со скоростью 30 Мбит/с, то целесообразно выбрать ту ЦСП, которая обеспечивает скорость обмена данными в 45 Мбит/с. Применение пяти систем, каждая из которых поддерживает скорость обмена информацией в 6 Мбит/с, обойдется дороже. Уверенно делая вывод об эффективности закупки оборудования, работающего на скорости 45 Мбит/с, Оператор связи ничего не знает о реальной стоимости проекта. По этой причине метод, основанный на расчете денежных единиц, можно считать весьма эффективным на этапе предварительного анализа возможных решений.

Оценки в денежных единицах позволяют получить полезную информацию, которая касается, например, затрат Оператора связи на резерв транспортных ресурсов. Данные, приведенные в [79], позволяют выбрать функцию, которая связывает величину скорости передачи – B и стоимость необходимых ресурсов – C_B.

На рисунке 3.31 приведена гистограмма, построенная на основе численных оценок B и C_B, которые содержатся в [79]. По обеим осям отложены нормированные значения исследуемых величин. Это значит, что координаты первого столбца образуют пару $(1,1)$.

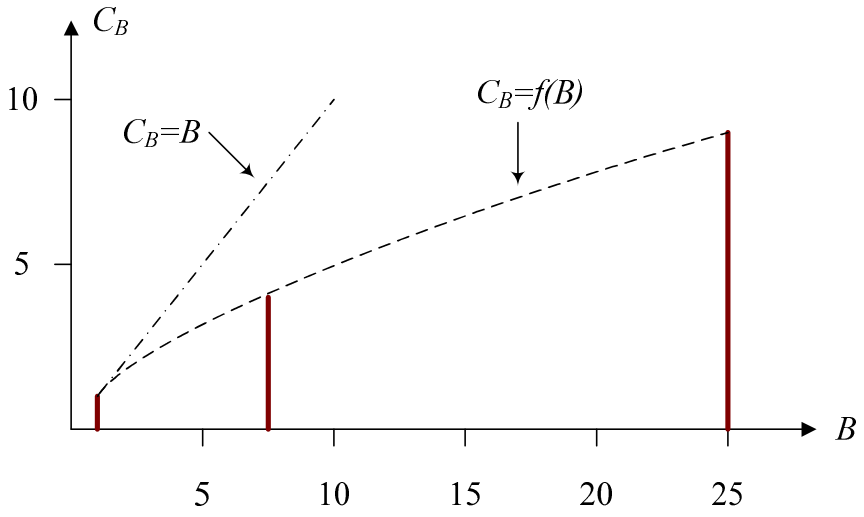


Рисунок 3.31. Выбор функции вида $C_B = f(B)$

Если бы величины C_B и B были связны прямо пропорциональной зависимостью, то график их нормированных значений можно было представить штрихпунктирной линией. Поведение исследуемой функции можно описать следующей зависимостью:

$$C_B \approx a_B + k_B B^x. \tag{3.18}$$

Для нормированных значений B и C_B методом наименьших квадратов [15] были получены такие значения всех трех коэффициентов, входящих в формулу (3.18): $a_B = 0$, $k_B = 1{,}0027$, $x = 0{,}6832$.

Вид полученной функции похож на зависимость стоимости системы передачи – C_N от количества создаваемых каналов – N. Характер этой зависимости известен [2, 80]:

$$C_N \approx a_N + k_N \sqrt{N}. \qquad (3.19)$$

Коэффициенты a_N и k_N также определяются методом наименьших квадратов [15] в результате обработки данных по проектам, содержащих значения N и C_N. Соотношения (3.18) и (3.19) позволяют сделать вывод о том, что избыточные транспортные ресурсы (в разумных пределах) не потребуют больших затрат Оператора связи. С другой стороны, наличие резерва транспортных ресурсов позволяет заметно снизить риск из-за ухудшения показателей качества облуживания трафика.

Примерную реальную стоимость проекта можно получить за счет выполнения всех расчетов по принятым методикам для ряда типовых проектов. Другой способ – анализ затрат других Операторов связи. Для этого необходимо получить и проанализировать статистическую информацию. В последние годы анонсировался ряд масштабных проектов по модернизации сети доступа на основе решений FTTx. Имеющиеся данные позволяют сделать ряд интересных оценок.

В статье [81] приводятся сведения о модернизации сетей доступа в Амстердаме и в Вене. Предполагается использование концепции FTTH со скоростью для пользователя 100 Мбит/с. В столице Нидерландов проект рассчитан на 400000 домохозяйств. Затраты на проект оцениваются в 300 млн. евро. Таким образом, на одно домохозяйство приходится *750 евро*. В столице Австрии за 10 – 15 лет предполагается подключить по технологии FTTH 950000 домохозяйств. Стоимость проекта составляет 800 млн. долларов. На одно домохозяйство затраты составят примерно *842 доллара* или около *1120 евро*.

Статья [82] посвящена планам компании Verizon по реализации концепции FTTH. Отмечено, что в 2007 году стоимость в расчете на одно домохозяйство стала ниже 1000 долларов. К 2010 году ожидалось дальнейшее снижение затрат Оператора связи – до уровня от *650 до 700 долларов*. При использовании стратегии вида FTTR инвестиции становятся менее *500 долларов*.

В Internet [83] была размещена информация о проекте FTTH в Роттердаме. Затраты оценивались на уровне *400 евро* для одного домохозяйства. Также в Internet [84] были опубликованы данные Оператора связи Sonaecom из Португалии. Они касались затрат на переход к ССП для одного миллиона домохозяйств, в которых проживает 25% населения страны. Величина инвестиций оценивалась как *240 евро* на одно домохозяйство.

Программа "Сеть XXI века", которая направлена на модернизацию системы связи в Великобритании [85], предусматривает перевод на IP технологии 28 млн. абонентов при инвестициях 18,2 млрд. долларов. Это значит, что удельные затраты составят порядка *650 долларов.*

В статье [86] указан диапазон затрат на решения класса FTTH. Он составляет *от 500 до 2000 евро.* Эта интервальная оценка хорошо корреспондируется с величинами, которые были приведены выше.

В 2011 году в Internet появилась новая информация, касающаяся затрат на развитие системы связи в Великобритании [87]. К сожалению, приведенные сведения о затратах относятся к двум технологиям – FTTR и FTTH. Усредненная величина инвестиций составила *300 долларов* на домохозяйство.

Проект National Broadband Network (национальная широкополосная сеть) в Новом Южном Уэльсе, штате на юго-востоке Австралии, предусматривает подключение 400000 домохозяйств [88]. Для достижения поставленной цели величина инвестиций составит 406 млн. долларов. Следовательно, на одно домохозяйство будет потрачено *1015 долларов*.

В [89] приведено распределение затрат при реализации концепции FTTH на базе технологии PON. Эти данные основаны на информации, приведенной компанией Corning и организацией "FTTH Council Europe"[90]. Распределение затрат из [89] воспроизведено в

таблице 3.9. Оно содержит сведения о соотношении отдельных статей расходов для усредненного проекта модернизации сети доступа на основе технологии PON.

Таблица 3.9. Распределение затрат на модернизацию сети доступа [89]

Виды расходов	Доля затрат
Стоимость работ	68%
Активное оборудование	12%
Непредвиденные затраты	9%
Установка	3%
Шкафы	2%
Оптическое волокно	6%

В руководстве [91] приведено иное распределение затрат, так как перечень расходов представлен четырьмя статьями. Соответствующая информация содержится в таблице 3.10. Можно констатировать, что данные из обеих таблиц похожи, хотя основаны на разных классификационных принципах.

Таблица 3.10. Распределение затрат на модернизацию сети доступа [91]

Виды расходов	Доля затрат
Стоимость работ	46%
Активное оборудование, размещаемое на станции	26%
Оборудование в помещении пользователя	16%
Материалы (кабель, шкафы, пассивное оборудование)	12%

На сайте [90] приведены интересные сведения, касающиеся идеологии FTTx. Это утверждение в равной мере относится к руководству [91], которое размещено на сайте [90]. В частности, констатируется (к сожалению, без каких-либо математических расчетов и статистических оценок), что типичная оптимальная емкость узла доступа для стран Европы составляет от 500 до 2000 домов.

Разброс оценок стоимости, приведенных в этом параграфе, обусловлен несколькими факторами. Иногда в проекте предусмотрены и другие работы, о которых не упоминается в тексте сообщения. Кроме того, затраты разнятся в зависимости от местных условий. И, наконец, правила подсчета инвестиций не одинаковы в разных странах. Тем не менее, интервальные оценки, которые приведены в этом параграфе, представляют собой полезные сведения. Кстати, полученные величины совпадают с расчетом инвестиций Оператора ТФОП на одну АЛ. Они составляют примерно *800 долларов* [92, 93].

Нельзя быть настоящим математиком,
не будучи немного поэтом.
(Т. Вейерштрасс)

3.4. Методика расчета коммутируемой сети

3.4.1. Перечень основных задач

При планировании коммутируемой сети приходится решать несколько задач. Их характер определяется стратегией развития инфокоммуникационной системы, выбранной Оператором связи. Если, например, предполагается повременить с переходом к ССП, то замена эксплуатируемых АТС современными цифровыми коммутационными станциями связана с хорошо известными задачами. Для них можно найти лучшие решения – близкие к оптимальным. Задачи такого рода будут рассматриваться в данной главе монографии с единственной целью – объяснение общих методологических принципов модернизации коммутируемых сетей. По всей видимости, переход к ССП стал необратимым процессом,

хотя данной концепции свойственны серьезные проблемы. Пути их преодоления пока еще не вполне понятны.

Тем не менее, из трех задач, о которых пойдет речь в этом параграфе, две почти не связаны с выбранной стратегией развития коммутируемых сетей. Эти задачи объединены общей целью: определить оптимальное количество узлов коммутации на каждом уровне иерархии, а также их емкость или производительность (в зависимости от выполняемых функций). В тексте монографии, который предшествовал этому разделу, были изложены аргументы, позволяющие сделать вывод о наибольшей актуальности обеих задач для сети доступа. Правда, методы решения могут оказаться приемлемыми и для остальных уровней иерархии коммутируемой сети.

Третья задача касается расчета производительности узлов коммутации. Корректнее говорить о совокупности задач, так как методы решения будут заметно различаться в зависимости от используемых принципов обработки трафика. Правда, с методологической точки зрения задачи формулируются единообразно:

- известны все необходимые для расчета параметры трафика, который должен быть передан через коммутируемую сеть, и перечень показателей качества обслуживания;
- необходимо *выбрать процесс* обслуживания трафика, включая численные значения ключевых показателей, которые позволяют выбрать необходимые технические средства.

Слова "выбрать процесс" следует толковать следующим образом. Во-первых, должен быть определен (насколько это возможно) закон распределения времени обслуживания заявок (для ССП под ними понимаются IP-пакеты). Этот закон можно представить при помощи ступенчатой ФР. Изменение характера такой функции может осуществляться различными способами. Во-вторых, следует выбрать дисциплины обслуживания заявок, которые обеспечат соблюдение установленных норм на качество обслуживания трафика. В-третьих, должна быть рассчитана интенсивность обслуживания – μ (или набор таких величин для заявок разных приоритетов), по которой вычисляется производительность узлов коммутации.

3.4.2. Выбор структуры сети доступа

Первым этапом выбора структуры сети следует считать SWOT-анализ результатов, дающих максимально полную информацию о существующем положении. Предположим, что необходимо провести модернизацию сети доступа, модель которой была показана на рисунке 2.27. Эта модель использовалась для решения задач, касающихся транспортной сети. В итоге была предложена модель, изображенная на рисунке 2.29. Количество узлов в транспортной сети осталось неизменным, что определяется решениями, принятыми, как правило, несколько десятилетий назад при создании *инфраструктуры*, то есть трасс прокладки трубопроводов кабельной канализации и мест размещения распределительных шкафов [94]. При этом структура транспортной сети изменилась весьма существенно. В ее составе появились кольца, обеспечивающие надежное подключение выносных модулей коммутируемых сетей.

В структуре коммутируемой сети происходят изменения, характер которых можно считать противоположным. Заметно меняется количество выносных модулей, а структура их связи с опорным коммутатором остается прежней – звездообразной.

На рисунке 3.32 приведена модель фрагмента коммутируемой сети доступа, которую планируется модернизировать в соответствии с требованиями ССП. Предполагается, что транспортная сеть, на базе которой планируется реализовать проект ССП, менялась так, как было показано на рисунках 2.27 и 2.29. Это значит, что потенциальные места размещения всех выносных модулей коммутируемой сети фактически предопределены. Рассматриваемая модель, по аналогии с иллюстрациями из второй главы монографии, изображена на координатной сетке. Показаны только пучки СЛ, которые использовались для

подключения УАТС. Другие выносные модули (в частности, концентраторы РАТС), что соответствует практике построения эксплуатируемых сетей доступа, отсутствуют. Штрихпунктирной линией обозначены границы зоны прямого питания.

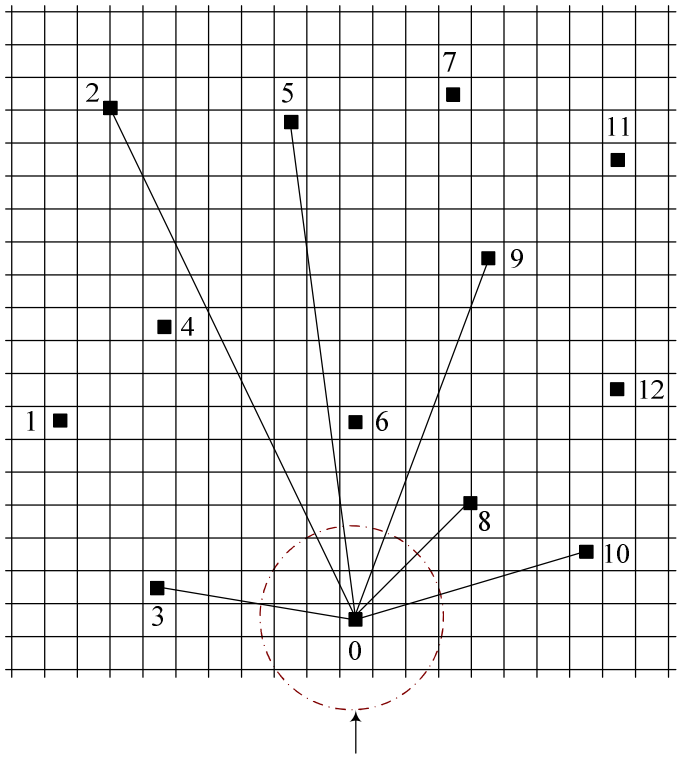


Рисунок 3.32. Модель коммутируемой сети до модернизации

Международный опыт свидетельствует, что применение концентраторов позволяло экономично строить сети доступа в период массового внедрения цифрового оборудования передачи и коммутации. Эта тенденция сохраняется и при переходе к ССП. Меняется терминология. Выносной концентратор становится мультисервисным; он более известен по аббревиатуре MSAN. Функции опорной РАТС выполняет узел коммутации, который в этой монографии называется транзитным коммутатором. В ряде публикаций предлагается термин "граничный маршрутизатор" – перевод словосочетания edge router. К сожалению, отечественная терминология для ССП не разработана. По этой причине в технической литературе для одного и того же технического устройства используется несколько, не всегда согласующихся между собой, понятий.

Судя по приведенным выше статистическим оценкам средней емкости цифровой АТС, методику расчета коммутируемой сети следовало пересмотреть около двадцати пяти лет назад. Пусть отношение средних значений емкости оптимальной и используемой цифровой АТС равно N. Предположим, что модель пристанционного участка может быть представлена в виде квадрата площадью S. В этом случае увеличение площади S при использовании цифровой АТС оптимальной емкости составит $\sqrt{N}$. Эта оценка получена на основании простых геометрических соотношений при условии, что потенциальные пользователи равномерно распределены по территории пристанционного участка.

Увеличение площади пристанционного участка можно рассматривать как процесс, который сопровождается увеличением количества выносных модулей на территории сети доступа. По этой причине модель, изображенная на рисунке 3.32, вполне приемлема для дальнейших рассуждений. Речь идет об увеличении количества выносных модулей в границах фрагмента рассматриваемой сети доступа.

С практической точки зрения целесообразно искать возможные места размещения выносных модулей среди тех точек, которые отмечены на модели: 1, 4, 6, 7, 11, 12. По всей видимости, необходимо учитывать, что территория зоны прямого питания будет со-

кращаться [24]. Этот процесс отмечен на рисунке 3.33, на котором изображена модель коммутируемой сети после завершения процесса модернизации. Предполагается, что в составе рассматриваемого фрагмента сети доступа появятся еще три выносных модуля под номерами 1, 6 и 11. Соответствующие направления нарисованы пунктирными линиями.

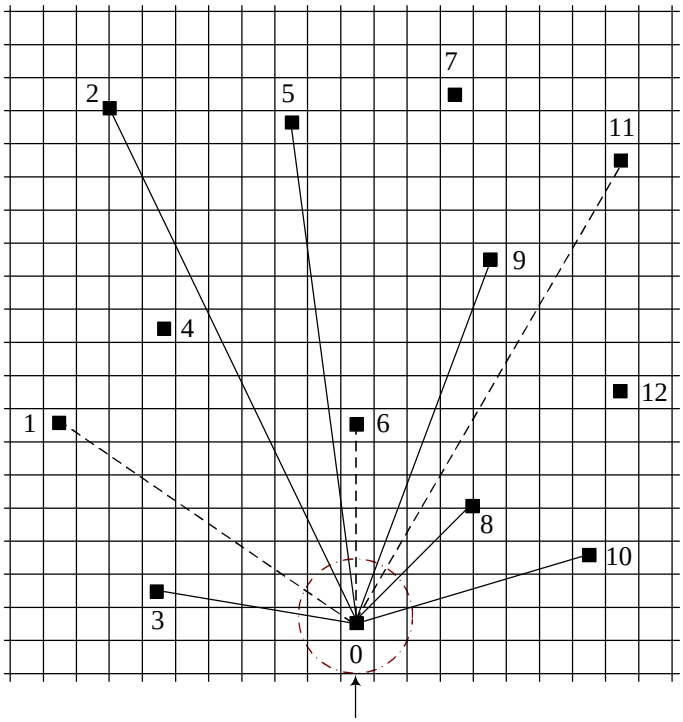


Рисунок 3.33. Модель коммутируемой сети после модернизации

Задачи определения рационального количества новых выносных модулей, расчета их производительности и выбора площадок для размещения оборудования следует решать совместно. Слово "рациональный" используется для того, чтобы подчеркнуть следующее: ищется решение, которое в первой главе монографии было названо устойчивым.

В первую очередь, следует изложить некоторые соображения, которые связаны с выбранной моделью. Рассматривается фрагмент сети доступа. Фрагментом можно считать любую часть сети доступа. Однако для задач планирования фрагмент уместно выбирать так, чтобы предлагаемые сценарии его модернизации не влияли на процессы развития оставшейся части эксплуатируемой сети доступа. По всей видимости, фрагментом сети доступа можно считать ее часть, которая создана в границах, определяемых решениями, принятыми для построения инфраструктуры. Предположим, что из здания, в котором располагалась заменяемая аналоговая АТС, были проложены четыре трассы кабельной канализации. Назовем соответствующие направления так: северное, восточное, южное и западное. Тогда можно выделить четыре одноименных фрагмента сети доступа. Модели, показанные на рисунках 3.32 и 3.33, можно считать фрагментом под названием "Север".

Следующий момент, который представляется важным с точки зрения выбора метода для дальнейших расчетов, заключается в оценке среднего значения количества узлов – k, расположенных в границах фрагмента сети доступа. Изучение проектов построения сетей доступа свидетельствует, что $k < 10$. При этом не менее трети узлов уже включено в состав сети доступа. Это значит, что при планировании сети требуется анализ для $k \le 6$ вершин графа, служащего моделью для фрагмента сети доступа. Эти оценки позволяют предложить поиск устойчивого решения путем полного перебора возможных альтернатив. При использовании персонального компьютера такая задача решается очень быстро.

Начать поиск рационального решения целесообразно с вершины, номер которой минимален. Естественно, что рассматриваются только те вершины, которые пока еще не за-

действованы в коммутируемой сети. Для предложенной модели ею будет вершина под первым номером. Общее количество вариантов – X, которое придется проанализировать, определяется на основании свойств биноминальных коэффициентов [15]:

$$X = \sum_{i=0}^{k} C_k^i = 2^k. \qquad (3.20)$$

Если $k \le 6$, то максимальное значение X равно 64. Для каждого конкретного проекта существует ряд вариантов, которые можно не принимать во внимание. Правда, и 64 варианта не так много для вычислений с использованием средств вычислительной техники.

Предположим, что в рассматриваемой модели вершины 7 и 12 следует исключить из дальнейшего анализа. Тогда необходимо провести вычисления затрат, которые определят целесообразность связи центрального узла сети с вершинами 1, 4, 6 и 11. Для вершины под первым номером возможны такие варианты модернизации сети доступа:

- направление "0 – 1", как и все остальные, не задействуется;
- создается направление "0 – 1", а вершины 4, 6 и 11 не подключаются;
- создаются направления "0 – 1" и "0 – 4";
- создаются направления "0 – 1" и "0 – 6";
- создаются направления "0 – 1" и "0 – 11";
- создаются направления "0 – 1", "0 – 4" и "0 – 6";
- создаются направления "0 – 1", "0 – 4" и "0 – 11";
- создаются направления "0 – 1", "0 – 6" и "0 – 11";
- создаются направления "0 – 1", "0 – 4", "0 – 6" и "0 – 11".

Для всех вариантов рассчитываются функции $NPV_j(1,t)$. Цифра в круглых скобках указывает на номер исследуемой вершины. Для первой вершины $j = \overline{1,9}$. Для вершины под вторым номером $j = \overline{1,4}$. Анализ вершины под шестым номером связан лишь с двумя альтернативами. При переходе к одиннадцатой вершине требуется вычисление только одной функции. Всего, как следует из соотношения (3.20) необходим анализ шестнадцати функций вида $NPV(z,t)$. Из них выбирается предпочтительная кривая – $NPV(z_{pre},t)$. Правила выбора обычно не формализуются, но они достаточно просты. Предпочтение (обозначение pre – первые три буквы в слове "*preference*") отдается той функции, для которой ожидаются максимальные доходы при соблюдении ограничений, выраженных при помощи возможных рисков [78, 95].

Вычисление функций вида $NPV(z,t)$ должно быть автоматизировано. Тогда процесс планирования сети не будет связан с выполнением большого объема рутинных операций. Кроме того, расчет исследуемых функций при помощи программных средств позволит исключить ошибки проектировщика, случающиеся при проведении сложных вычислений.

Предпочтительная функция $NPV(z_{pre},t)$ напрямую определяет и количество новых выносных модулей, и места их размещения. Производительность выносного модуля – один из аргументов функции $NPV(z,t)$, относящийся к статье "Затраты". Для расчета соответствующих затрат необходимо знать цены на оборудование, которое предназначено для использования в качестве выносного модуля. В данном случае использование метода, основанного на операциях с *денежными единицами*, не приведет к желаемым результатам. Анализ кривых $NPV(z,t)$ приходится осуществлять с учетом затрат на модернизацию транспортной сети, что было подчеркнуто во второй главе монографии. Дело в том, что для каждого сценария эволюции коммутируемой сети затраты на транспортные ресурсы будут не одинаковы.

При расчете значений $NPV(z,t)$ по формуле (1.18) в приток денежных средств за период времени t должны быть включены доходы, определяемые с учетом возможностей, которые присущи рассматриваемому варианту модернизации сети доступа. Величина ин-

вестиций в $t-ом$ периоде для исследуемого решения должна содержать затраты на создание линий передачи и оборудование выносного модуля. Следует также учитывать, что новый выносной модуль не только обеспечит расширение спектра поддерживаемых услуг, но и позволит снизить эксплуатационные расходы.

Для формирования правил по выбору предпочтительного варианта модернизации сети вполне приемлем пример с тремя кривыми вида $NPV(z,t)$, приведенный на рисунке 3.30. Он воспроизведен на рисунке 3.34 в иной форме. Значения $NPV(z,t)$ показаны для равноотстоящих моментов времени, в которые Оператор связи подводит финансовые итоги по реализации проекта. Рассматриваются три варианта модернизации сети доступа, то есть $z=3$. Предполагается, что риски, свойственные всем альтернативам, приемлемы для Оператора связи.

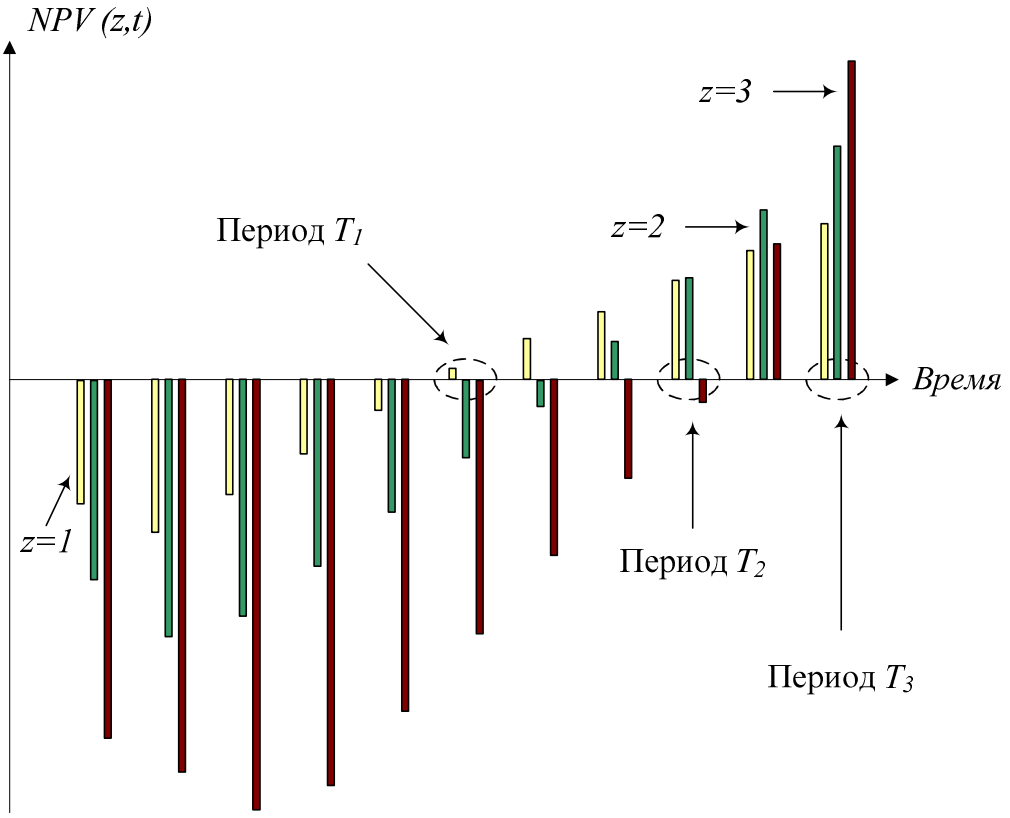


Рисунок 3.34. К вопросу о выборе предпочтительного варианта модернизации сети

Для выбора предпочтительного варианта модернизации сети уместно рассматривать несколько периодов времени, отсчитывая их от точки $t=0$. Для периода времени T_1 более привлекателен первый вариант. Следует отметить, что оценкам за период времени T_1, как правило, будет свойственна весьма высокая достоверность. Если анализируется период времени T_2, то предпочтительнее становится второй вариант модернизации сети доступа. Наконец, для периода T_3 более высокие доходы обещает третий вариант реализации проекта. Учитывая снижение достоверности оценок $NPV(z,t)$ по мере роста аргумента t, ответ на вопрос о выборе варианта модернизации становится похож на проблему "синицы в руках или журавля в небе". Именно по этой причине приходится организовывать диалог ЛОР и ЛПР на данном этапе планирования сети.

Если финансовые ограничения и по объему максимальных инвестиций, и по сроку окупаемости проекта соответствуют международной практике, то можно использовать приведенную выше интервальную оценку типичной емкости узла доступа – от 500 до 2000 домов [90, 91]. Количество квартир в доме также может отличаться весьма существенно. Среднее количество квартир в доме для Санкт-Петербурга, Новосибирска и Мурманска

(по данным, размещенным на официальных сайтах этих городов) составляет 38,4 56,6 и 57,3 соответственно. Для Северной столицы доступны данные по районам города. Анализ этих данных показал, что исследуемая величина лежит в диапазоне от 4,1 до 145,8 квартир. Такой размах распределения обусловлен, в основном, включением в состав города ряда небольших населенных пунктов, находящихся на заметном удалении от географического центра. Коэффициент вариации количества квартир в доме составляет 0,79. Если взять среднее значение квартир в доме, суммируя статистические данные по районам города, то искомая величина составит 53,7. Таким образом, оценки для трех российских городов очень близки. Следовательно, диапазон 500 до 2000 домов можно пересчитать в 27500 – 110000 ИПС. Эти величины хорошо корреспондируются с оценками емкости цифровых коммутационных станций в развитых странах [24].

Численные значения исследуемого диапазона лучше заменить переменными M_{min} и M_{max}. Для предпочтительного значения M_{pre} справедливо следующее неравенство:

$$M_{min} \le M_{pre} \le M_{max}. \qquad (3.21)$$

Значение M_{pre} выбирается из набора величин вида $M_{min} + h\Delta M$. Переменная h – число натурального ряда, максимальное значение которого определяется в результате деления разницы $\left(M_{max} - M_{min}\right)$ на величину ΔM. Делитель представляет собой такое приращение количества обслуживаемых домохозяйств, которое следует использовать для приемлемой точности выбора величины M_{pre}.

Для детализации предлагаемого подхода к выбору структуры сети доступа далее используется модификация модели, которая была показана на рисунке 3.32. Отличие заключается в том, что используется меньшее количество узлов – вершин графа. Модель исследуемой сети доступа изображена на рисунке 3.35 в виде графа.

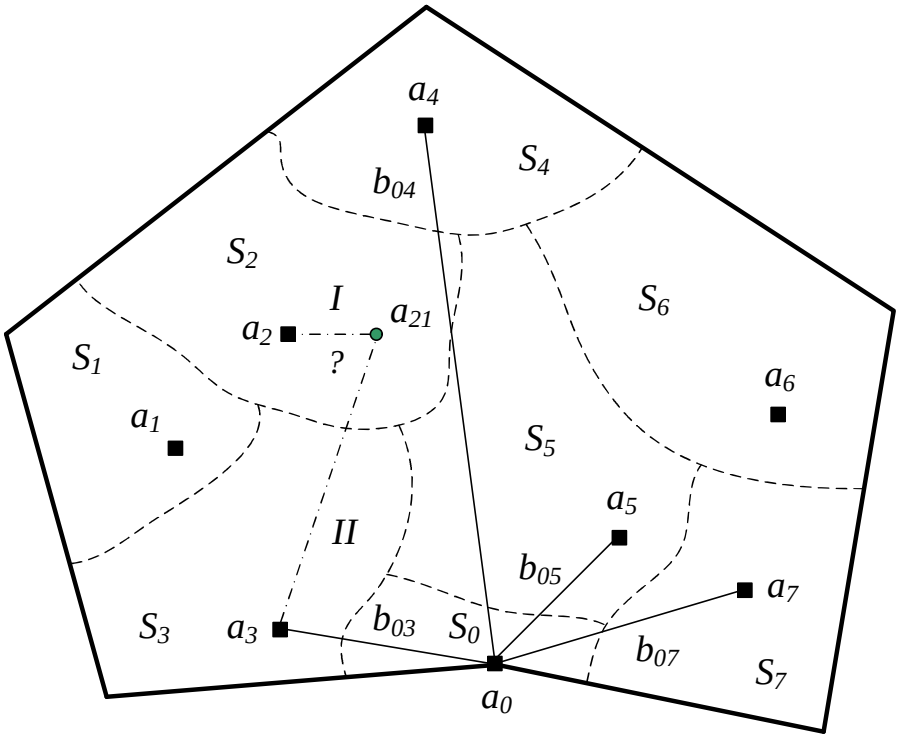


Рисунок 3.35. Модель исследуемой сети доступа

Для $i-ой$ вершины графа определен кортеж $\left(x_{1i}, x_{2i}, ..., x_{mi}\right)$, который содержит все необходимые сведения о соответствующем узле сети доступа. Для каждого ребра между вершинами 0 и i также задан кортеж $\left(y_{1i}, y_{2i}, ..., y_{ni}\right)$, позволяющий получить все данные для планирования сети. Пунктирными линиями обозначены границы восьми территорий

(включая зону прямого питания), каждая из которых имеет площадь S_i. Эти границы определены как для эксплуатируемых, так и для планируемых к использованию выносных модулей. Для территории с площадью S_2 показан новый объект a_{21}, который может быть соединен с узлом a_2 (вариант I), если он будет задействован на основании проектных решений. Если создание соответствующего узла не будет признано разумным, то можно, например, использовать вариант II, то есть соединить вершины a_{21} и a_3. Оба решения показаны штрихпунктирными линиями.

Для анализа предложенной модели необходимо ввести ряд допущений, а также ввести некоторые количественные значения. Характер всех допущений выбран так, чтобы они не влияли на суть предложенной методики планирования сети.

Во-первых, следует определить площади территорий к началу разработки проекта t_0. Дело в том, что узлы a_1, a_2 и a_6 не используются, а в границах территорий S_1, S_2 и S_6 расположены терминалы пользователей. Введем восемь функций $D_i(t_0)$, которые можно записать в таком виде:

$$\begin{aligned} &D_0(t_0)=S_0, \quad D_1(t_0)=0, \quad D_2(t_0)=0, \quad D_3(t_0)=S_1+S_3, \\ &D_4(t_0)=S_2+S_4, \quad D_5(t_0)=S_5, \quad D_6(t_0)=0, \quad D_7(t_0)=S_6+S_7. \end{aligned} \tag{3.22}$$

Не исключено, что к моменту завершения проекта t_f ни одна из функций $D_i(t_r)$ не изменится. Конечно, такое решение представляется маловероятным с учетом тенденций изменения стоимостных показателей в телекоммуникационных сетях.

Во-вторых, необходимо знать затраты на модернизацию эксплуатируемых линий передачи (если, эта операция необходима) и на построение трех новых направлений: b_{01}, b_{02} и b_{06}. Соответствующие затраты необходимо задать как функции, зависящие, в том числе, от выбранного сценария k и времени t. Эти функции будут далее обозначаться как $C(k,t)$. Для всех возможных значений t справедливо следующее неравенство: $t_0 \le t \le t_f$.

В-третьих, предположим, что ЛПР определило одну точку, для которой необходимо найти предпочтительное решение – t_{pre}. Тогда достаточно найти значения всех функций $C(k,t)$ только в точке t_{pre}.

В-четвертых, допустим, что предварительный анализ проекта позволил ограничить совокупность возможных сценариев, направленных на модернизацию фрагмента сети доступа. В частности, достаточно рассмотреть только три возможности построения новых линий передачи: b_{01} и b_{02}, b_{01} и b_{06}, b_{02} и b_{06}. Для трех сценариев модернизации, которые следует анализировать, вычислены значения $C(1,t_{pre})$, $C(2,t_{pre})$ и $C(3,t_{pre})$. Они сведены в таблицу 3.11. Численные значения вида $C(k,t_{pre})$ приведены в *денежных единицах*.

Таблица 3.11. Стоимость ребер вида b_{0i} к моменту времени t_{pre}

Вид ребра	b_{00}	b_{01}	b_{02}	b_{03}	b_{04}	b_{05}	b_{06}	b_{07}
$C(1,t_{pre})$	1	29	42	8	17	7	0	9
$C(2,t_{pre})$	5	34	0	8	17	5	48	4
$C(3,t_{pre})$	5	0	45	8	17	5	48	4

В-пятых, для исследуемых сценариев модернизации сети доступа должны быть получены оценки притока денежных средств к моменту времени t_{pre}. Эти величины будут определять первое слагаемое в формуле (1.18). Второе слагаемое вычисляется как сумма элементов таблицы 3.11 в соответствующей строке. Пусть оценки притока денежных средств к моменту времени t_{pre} соответствуют величинам, приведенным в таблице 3.12. Как и в предыдущей таблице, численные оценки получены в *денежных единицах*.

Таблица 3.12. Приток денежных средств к моменту времени t_{pre}

Номер сценария	Оцениваемая величина
1	252
2	252
3	274

Теперь по формуле (1.18), можно рассчитать величину чистой текущей стоимости для трех сценариев модернизации сети доступа. В таблице 3.13 приведены результаты расчета, включая раздельно значения первого и второго слагаемых из формулы (1.18).

Таблица 3.13. Чистая текущая стоимость проекта к моменту времени t_{pre}

Номер сценария	Первое слагаемое	Второе слагаемое	$NPV(z,t_{pre})$
1	252	–113	139
2	250	–121	129
3	274	–132	142

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что предпочтительным следует считать третий сценарий. Данный вывод основан на критерии максимизации значения чистой текущей стоимости. Если не оценивать *доходную часть* (оно выражено первым слагаемым в используемой формуле), то критерием выбора предпочтительного сценария будет минимальное по модулю значение второго слагаемого. Подобный подход допустим, если невозможно оценить потенциальные доходы, но предположение об их равенстве считается приемлемым. Для рассматриваемого примера предпочтительным становится первый сценарий.

Различие в значениях $NPV(z,t_{pre})$ между первым и третьим сценариями составляет около двух процентов. Эта величина соизмерима с погрешностью исходных данных. По этой причине ЛПР может выбрать первый сценарий как предпочтительный по каким-либо соображениям. Тем не менее, ЛОР должен ранжировать полученные решения именно в той последовательности, которая определяется последним столбцом таблицы 3.13.

Для иллюстрации принципов выбора предпочтительного значения M_{pre} рассмотрим ту часть модели, показанной на рисунке 3.35, которая связана с подключением объекта a_{21}. Предположим, что данный объект под этим номером – новый многоквартирный дом, появление которого не было учтено при разработке проектной документации. Если будут выбраны второй или третий сценарий, то в сети доступа появится узел a_2. Логичное решение заключается в присоединении объекта a_{21} к узлу a_2. Не исключено, что ЛПР выберет первый сценарий модернизации сети доступа. Предположим, что в этом случае объект следует подключить к узлу a_3.

Для выбора предпочтительного значения M_{pre} более интересен случай появления узла a_2. Такое утверждение обусловлено изменением двух функций вида $D_i(t_{pre})$:

$$D_2(t_{pre}) = S_2, \quad D_4(t_{pre}) = S_4. \tag{3.23}$$

Модели фрагмента сети, приведенной на рисунке 3.35, было присвоено название "Север". Это значит, что в ее границах размещено примерно 25% всех обслуживаемых ИПС. В границах каждой из восьми территорий находится примерно 3,125% ИПС, если считать их распределение по площадям S_i равномерным.

Тогда в границах территории с площадью S_2 к новому узлу a_2 можно присоединить от 860 до 34375 ИПС. Эти данные получены делением приведенных выше оценок (27500 – 110000 ИПС) на 32. В этом диапазоне следует определить значение M_{pre}. Это значит, что

количество ИПС, которые ранее были включены в узел a_4, сократится, примерно, на величину, равную M_{pre}. На рисунке 3.36 показаны два исследуемых узла в границах обслуживаемых ими территорий. Поставленную задачу можно рассматривать как перераспределение ИПС между узлами a_2 и a_4. Критерием выбора варианта перераспределения следует считать максимум значения $NPV(z,t)$ при $t = t_{pre}$. Ниже будет рассмотрен более простой случай, когда первое слагаемое формулы (1.18) остается неименным. Это означает, что критерием выбора окончательного решения становится минимум затрат к моменту времени t_{pre}.

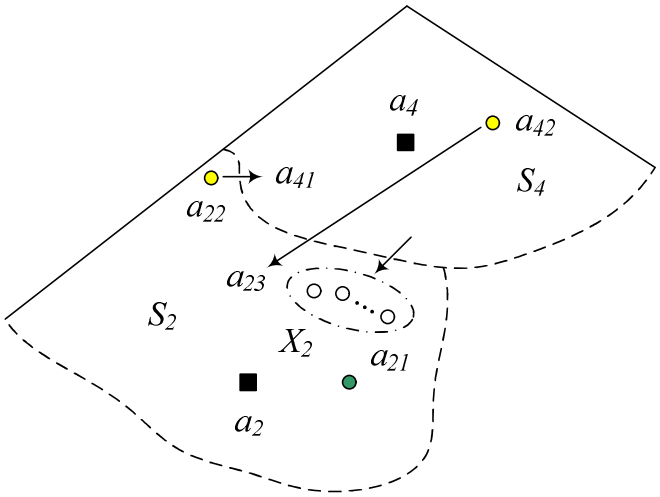


Рисунок 3.36. Модель части сети доступа с двумя узлами

Сначала необходимо выбрать величину ΔM. С учетом статистических данных по количеству квартир в одном доме можно считать, что минимальное значение $\Delta M = 50$. Тогда, как следует из текста после неравенства (3.21), придется рассмотреть 609 вариантов решения поставленной задачи. С практической точки зрения автоматизация вычислений позволяет быстро оценить все возможные решения. С другой стороны, величину M можно рассматривать как случайную, изменяющуюся на интервале $[M_{min}, M_{max}]$. Судя по типичным проектам, поведение величины M хорошо характеризует распределение Симпсона [96]. Среднее значение – $M^{(1)}$ и стандартное отклонение – σ_M для данного распределения определяются следующими соотношениями [96]:

$$M^{(1)} \approx \frac{M_{max} + M_{min}}{2}, \quad \sigma_M = \frac{M_{max} - M_{min}}{2\sqrt{6}} \approx 0,2041\left(M_{max} - M_{min}\right). \tag{3.24}$$

Величина M_{pre}, как правило, находится в пределах $M^{(1)} \pm \sigma_M$. Тогда границы M_{min} и M_{max} можно заменить величинами $M^{(1)} - \sigma_M$ и $M^{(1)} + \sigma_M$ соответственно. Для выбранной модели новые границы определяются такими числами: 10777 и 24458. Следовательно, количество рассматриваемых альтернатив сокращается с 609 до 274.

Предварительный анализ территорий, обслуживаемых узлами a_2 и a_4, позволяет заметно сократить объем вычислений. На рисунке 3.36 выделены три объекта: X_2, a_{22} и a_{42}. Предположим, что им присущи следующие особенности:

- объект X_2 представляет собой совокупность строений, которую, *вне всякого сомнения*, следует подключить к узлу a_2;
- объект a_{22}, находящийся на территории S_2 не следует переключать в узел a_2 по причине, которая не связана с поиском эффективного пути для развития сети доступа (этому объекту присваивается название a_{41});

- объект a_{22}, расположенный далеко от границ территории S_2, целесообразно переключить в узел a_2 также по причине, которая не связана с эффективным решением по модернизации сети доступа (этому объекту присваивается название a_{23}).

Предварительный анализ такого рода позволяет, как минимум, на порядок сократить объем необходимых вычислений. После получения результатов анализа поставленную задачу обычно необходимо решить для нескольких объектов вида a_{2i} и a_{4j}, которые расположены вблизи границы между территориями S_2 и S_4. Предположим, что выделено семь таких объектов: $a_{25}, a_{27}, a_{29}, a_{44}, a_{46}, a_{47}, a_{49}$. Для каждого из них определены две величины затрат Оператора связи – $C_{ij}(2)$ и $C_{ij}(4)$. Эти величины определяют инвестиции для подключения объекта a_{ij} ко второму и к четвертому узлу соответственно. Сравнение каждой пары значений $C_{ij}(2)$ и $C_{ij}(4)$, которые удобно свести в матрицу или в таблицу, позволяет найти решение поставленной задачи.

На рисунке 3.37 изображена введенная выше модель, но с небольшими отличиями. В частности, ряд элементов, которые уже рассматривались, отсутствует. Нарисован эллипс, в границах размещены семь новых объектов с указанием их номеров в соответствии с географическим расположением. Результаты, полученные после проведения вычислений, идентифицируются при помощи окраса объектов. Темный цвет указывает на тот факт, что данный элемент *рекомендуется* подключить к узлу a_4. Если использован неокрашенный кружок, то соответствующий объект *предлагается* обслуживать за счет ресурсов узла a_2.

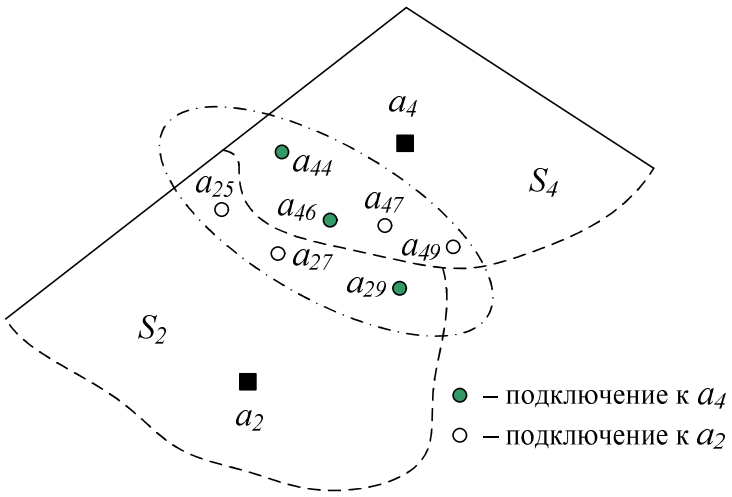


Рисунок 3.37. Размещение семи объектов в границах S_2 и S_4

Результаты, полученные после выполнения вычислений, основаны на оценках $C_{ij}(2)$ и $C_{ij}(4)$, которые приведены в таблице 3.14. Эти оценки были заданы для семи объектов, выбранных для рассматриваемого примера, в денежных единицах.

Таблица 3.14. Затраты на подключение семи объектов к узлам a_2 и a_4

Объект	a_{25}	a_{27}	a_{29}	a_{44}	a_{46}	a_{47}	a_{49}
$C_{ij}(2)$	3	4	5	7	4	5	6
$C_{ij}(4)$	5	6	4	5	3	7	9

Методологические подходы, использованные в этом параграфе, ориентированы на сети доступа. Тем не менее, значительная часть результатов может применяться и при ре-

шении аналогичных задач для других иерархических уровней. Безусловно, в некоторых случаях потребуется доработка моделей, методов их исследования, а также интерпретации полученных результатов.

При разработке предложений по структуре телекоммуникационной сети на разных уровнях иерархии необходимо учитывать положения, изложенные в рекомендации МСЭ Е.721 [97], а также современные тенденции по сокращению количества узлов коммутации при установлении соединения между ИПС. В таблице 3.15 приведены типичные значения по количеству узлов коммутации в ТФОП. При установлении соединений в ТФОП вместо "ИПС" обычно используется слово "терминал".

Таблица 3.15. Количество узлов коммутации при связи терминалов в ТФОП

Вид соединения, устанавливаемого между терминалами		
Местное	Междугородное	Международное
1 – 4	5 – 7	8 – 10

Следует подчеркнуть, что статистика, которая послужила информационной базой для составления таблицы 3.15, собиралась МСЭ в начале 90-х годов XX века. В это время еще не использовались узлы коммутации ССП, но тенденция сокращения количества иерархических уровней в ТФОП уже нашла практическое применение [24]. В тексте [97] отмечается, что в 93% всех международных соединений используется семь или меньшее количество узлов коммутации. Правда, в 0,02% случаев было задействовано более 11 узлов коммутации.

Использование выносных модулей в сетях доступа может рассматриваться как введение еще одного узла коммутации. С другой стороны, сокращается численность узлов коммутации, используемых на других уровнях иерархии телекоммуникационной сети. По этой причине оценки, приведенные в таблице 3.15, можно считать приемлемыми для решения задач по выбору структуры ССП.

3.4.3. Расчет производительности узлов коммутации

Задачи, решаемые в процессе расчета производительности узлов коммутации, можно уверенно отнести к одним из самых сложных в планировании телекоммуникационных сетей. Этот тезис подтверждается публикациями, отражающими результаты исследования в период активного использования декадно-шаговых, координатных и цифровых систем коммутации [98 – 103]. Замечательный обзор важнейших работ по теории телетрафика, выполненных до 1982 года, приведен в [104]. По мере формирования концепции ССП появились монографии по расчету соответствующих узлов коммутации и сети в целом [105, 106].

Оборудование, используемое в узлах коммутации разных поколений, базируется на несхожих принципах, а теоретические положения исследования его производительности меняются незначительно. Данное утверждение можно прокомментировать, обратившись к первой формуле Эрланга [100 – 103]. Она определяет вероятность потери заявки – p для СМО с дисциплиной обслуживания без ожидания. Если известны интенсивность нагрузки – Y и количество обслуживающих приборов – V, то искомая вероятность рассчитывается по такой формуле:

$$p = \frac{\dfrac{Y^V}{V!}}{\sum_{i=0}^{V} \dfrac{Y^i}{i!}}. \qquad (3.25)$$

В практике планирования сетей, использующих дисциплину обслуживания с явными потерями, обычно требуется найти такую минимальную величину V для интенсивности

нагрузки Y, при которой соблюдается установленная норма на вероятность потери p. Поиск величины V осуществляется при помощи таблиц [101] или программ, которые обычно называют Эрланг-калькуляторами. Разделив величину Y на полученное значение V, можно оценить нагрузку – ρ, приходящуюся на один обслуживающий прибор. Для однолинейной системы эта задача упрощается:

$$\rho = \frac{p}{1-p}. \tag{3.26}$$

Заметим, что для СМО с явными потерями ограничение $\rho < 1$, свойственное всем системам с ожиданием, не устанавливается. Для очень малых значений p необходимо ограничить нагрузку СМО. В частности, последнее выражение при небольшой вероятности потерь можно записать в такой форме: $\rho \approx p$. Если же допускаются высокие вероятности потерь, то величина ρ может быть очень большой (существенно превышать единицу).

Задачи вычисления величины V и оценки допустимого уровня ρ эквивалентны. Для сетей телефонной связи, основанных на технологии коммутации каналов, в рекомендации МСЭ Q.543 [106] нормированы два вида эталонной интенсивности нагрузки (*reference load*). В рекомендации МСЭ Q.543 они названы "*reference load A*" и "*reference load B*". Для них определены численные значения 0,7 Эрл и 0,8 Эрл соответственно. Эти величины можно рассматривать как два значения нагрузки – ρ_A и ρ_B. Они входят в формулы для оценки количества попыток вызовов для обоих значений эталонной нагрузки – C_A и C_B, если известно количество обслуживающих приборов – V и математическое ожидание времени обслуживания – $B^{(1)}$ [107]:

$$C_A = \frac{\rho_A V}{B^{(1)}}, \quad C_B = \frac{\rho_B V}{B^{(1)}}. \tag{3.27}$$

Соотношения (3.27) служат основой для оценки производительности для систем с коммутацией каналов. Обычно величина производительности для этих систем измеряется *количеством попыток вызовов в ЧНН*. Для учета затрат ресурсов узла коммутации при поддержке каких-либо дополнительных функций следует использовать более сложные выражения. Они позволяют достичь максимальной точности ожидаемых результатов, но отправной точкой для методики оценки производительности оборудования с коммутацией каналов остаются соотношения (3.27).

Для узлов коммутации в телефонных сетях (как аналоговых, так и в цифровых) термин "заявка" ассоциируется с вызовом, а функции его обслуживания осуществляются, в основном, за счет использования дисциплины с явными потерями. Узлы коммутации в ССП ориентированы на дисциплину обслуживания с ожиданием, а термин "заявка", как правило, относится к IP-пакету. Эти различия не меняют зависимость производительности узла коммутации пакетов – $C_{ССП}$ от нагрузки $\rho_{ССП}$. Для вычисления величины $C_{ССП}$ будет справедливым выражение следующего вида:

$$C_{ССП} = \rho_{ССП} F(\lambda_i, d_i, IPTD_i, IPDV_i, IPLR_i). \tag{3.28}$$

Величина λ_i соответствует интенсивности поступления IP-пакетов $i-го$ класса в узел коммутации, переменная d_i идентифицирует дисциплину обслуживания, принятую для IP-пакетов $i-го$ класса. Три следующие аргумента определяют те показатели QoS, которые установлены для ССП в рекомендации МСЭ Y.1541.

Выбор величины $\rho_{ССП}$ может быть сделан двумя основными способами. Первый из них основан на сложных исследованиях, которые позволяют максимизировать искомый параметр. Такой подход очень привлекателен по ряду причин, среди которых доминируют

экономические соображения. Чем выше уровень $\rho_{ССП}$ (эту величину уместно сравнивать с *коэффициентом полезного действия*), тем ниже себестоимость услуг Оператора связи. Второй способ основан на опыте, накопленном при эксплуатации сетей с пакетными или с похожими на них технологиями. В частности, для звена общеканальной сигнализации в рекомендациях МСЭ серии Q.700 была установлена нагрузка $\rho \le 0,2$. Можно, в качестве примера, назвать две причины такого решения:

- отсутствие механизмов приоритетного обслуживания для различных видов сигнальных единиц,
- возможность заметного увеличения трафика при введении новых услуг или функциональных требований к инфокоммуникационной системе.

Следует учитывать, что стоимость построения сети сигнализации с избыточными ресурсами относительно не велика. Речь идет о сравнении с теми инвестициями, которые потребуются на создание ССП со столь значительным запасом производительности. По всей видимости, можно утверждать, что для ССП будет соблюдаться условие $\rho_{ССП} > 0,2$. Очевидно, что верхней границей можно считать величину ρ_B. Это значит, что при поиске допустимого уровня нагрузки можно руководствоваться таким неравенством:

$$0,2 < \rho_{ССП} < 0,8. \qquad (3.29)$$

В Приложениях 2, 6 и 7 содержатся соотношения, позволяющие остановиться на первом способе выбора величины $\rho_{ССП}$. Правда, прогностические оценки трафика ССП могут стимулировать отказ от исследований, если величины λ_i будут возрастать очень быстро. Тогда второй способ выбора величины $\rho_{ССП}$ становится более привлекательным.

Более того, целесообразность ориентации на второй способ выбора величины $\rho_{ССП}$ подтверждается рядом соображений, среди которых уместно упомянуть зависимость вида $IPLR = f(\rho)$. Известно, что для поддержки ряда инфокоммуникационных услуг требуется очень малая вероятность потери IP-пакетов [13, 108]. Для СМО $M/M/1/r/f_0^0$ в [109] приведено соотношение, позволяющее рассчитать вероятность потери IP-пакетов – π по известным значениям нагрузки и количества мест для ожидания в очереди – ρ и r соответственно:

$$\pi = \frac{(1-\rho)\rho^{r+1}}{1-\rho^{r+2}}. \qquad (3.30)$$

Величина π, строго говоря, не может считаться показателем $IPLR$ с точки зрения совокупности событий, приводящих к потере IP-пакета. Тем не менее, приближенное соотношение $IPLR \approx \pi$ следует считать приемлемой оценкой для исследования значений показателей QoS при отсутствии перегрузки в ССП и существенного роста искажений передаваемой информации.

В отчете [110] приведен график, иллюстрирующий зависимость $IPLR = f(\rho)$ для пакетной сети. Поведение кривой совпадает с функцией, построенной при вычислениях по формуле (3.30). График из отчета [110] воспроизведен на рисунке 3.38. Выделены три значения нагрузки ρ, определяющие пороговые значения для разных видов услуг. Слово "вид" используется здесь как таксон, определяемый требованиями к пороговому значению вероятности потери IP-пакетов, а не к сути функциональных возможностей, которые предоставляются телекоммуникационной сетью.

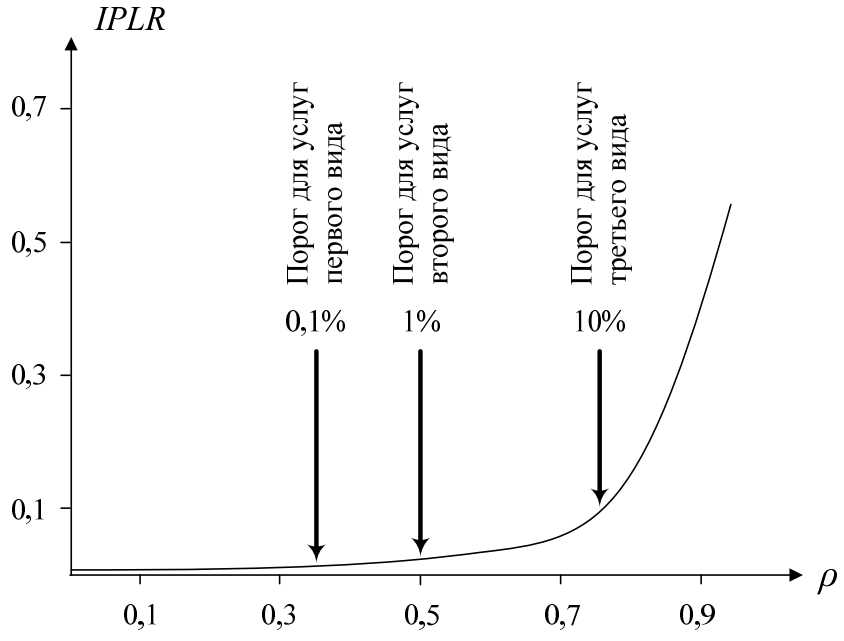


Рисунок 3.38. Вероятность потери IP-пакетов при разной нагрузке

Характер зависимости $IPLR = f(\rho)$ позволяет сделать три весьма важных вывода. Во-первых, следует отметить, что для совокупности всех видов услуг подтверждается корректность неравенства (3.29). Во-вторых, при отсутствии приоритетных механизмов для установки IP-пакетов в очередь на обработку в узле коммутации необходимо выбрать минимальное из трех значений нагрузки (иными словами, $\rho_{ССП} \approx 0,35$). В-третьих, при выборе значения $\rho_{ССП}$ следует помнить о системных положениях, касающихся запаса пропускной способности и производительности ресурсов ССП. В результате, условие $\rho_{ССП} \le 0,35$ может оказаться вполне приемлемым для оценки производительности узла коммутации.

Расчет производительности узла коммутации должен быть выполнен так, чтобы соблюдались все нормированные показатели качества обслуживания трафика. Показатели такого рода устанавливаются между ИПС. По этой причине необходимо последовательно выполнить две операции. Во-первых, следует провести декомпозицию всех показателей по иерархическим уровням телекоммуникационной сети. Во-вторых, для каждого уровня иерархии необходимо распределить все показатели между узлами коммутации. Если на иерархическом уровне располагается только один узел коммутации, то вторая операция не требуется.

Принципы декомпозиции показателей качества обслуживания по уровням иерархии изложены в рекомендации МСЭ Y.1542 [111]. В качестве примера в этой рекомендации рассматривается распределение показателя $IPTD$. В седьмом Приложении к монографии приведены соображения по декомпозиции трех показателей: $IPTD$, $IPDV$ и $IPLR$. Ниже на основании ряда соотношений, полученных в упомянутом Приложении, определены *примерные* значения величин $IPTD$ и $IPDV$. Для $IPLR$ задача декомпозиции решается за счет использования формулы (П7.25), в которой значение N выбирается из таблицы 3.15. Для упрощения вычислений можно считать, что $N = 10$.

Принципы распределения показателей $IPTD$ и $IPDV$ базируются на нескольких допущениях. Во-первых, главными таксонами служит уровень иерархии сети и класс QoS. Во-вторых, для междугородного соединения между двумя ИПС выбрана максимально возможная протяженность устанавливаемого соединения. В-третьих, для показателя $IPDV$ определены нормы, которые имеют некоторый запас. Причина появления такого запаса обусловлена упрощенным принципом выбора значений $IPDV(j)$ для каждого

$j-го$ компонента соединения между ИПС. В [17] и в Приложении 7 показано, что справедливо следующее неравенство:

$$IPDV > \sum_{\{J\}} IPDV(j). \qquad (3.31)$$

Поскольку разница между левой и правой частью в неравенстве (3.31) не велика, то для упрощения решения поставленной задачи можно заменить знак "$>$" на символ "$\approx$":

$$IPDV \approx \sum_{\{J\}} IPDV(j). \qquad (3.32)$$

В таблице 3.16 приведены значения показателя $IPTD$ для соединения между ИПС, которое устанавливается через междугородную сеть. Напомним, что для пятого класса QoS показатель $IPTD$ в рекомендациях МСЭ не устанавливается. Для междугородного фрагмента ССП выбраны нормы с учетом значительной протяженности некоторых видов соединений.

Таблица 3.16. Распределение нормы на $IPTD$ по уровням иерархии ССП

Рекомендуемая величина $IPTD_i$ для классов QoS	Уровень иерархии ССП (связь между двумя ИПС)		
	Местная сеть A	Междугородная сеть	Местная сеть B
0, 2 и 6 (100 мс)	20	60	20
1, 3 и 7 (400 мс)	40	320	40
4 (1000 мс)	200	600	200

Очевидно, что классы обслуживания 0, 2 и 6 не могут поддерживаться в тех случаях, когда соединение проходит по каналам искусственных спутников Земли, находящихся на геостационарной орбите. Такое ограничение не свойственно остальным классам QoS.

Показатель $IPDV$ устанавливается только для нулевого и первого классов QoS. Кроме того, его номинал не меняется. По этой причине в таблице 3.17 классы QoS не указаны. Следует также учитывать, что протяженность тракта обмена IP-пакетами между ИПС не влияет на величину $IPDV$.

Таблица 3.17. Распределение нормы на $IPDV$ по уровням иерархии ССП

Рекомендуемая величина $IPDV$ (50 мс)	Уровень иерархии ССП (связь между двумя ИПС)		
	Местная сеть A	Междугородная сеть	Местная сеть B
	20 мс	10 мс	20 мс

Величины, приведенные в таблицах 3.16 и 3.17, следует рассматривать только как ориентировочные значения. В зависимости от особенностей фрагментов ССП возможны различные варианты перераспределения норм, которые заданы между ИПС. Например, в какой-либо местной сети из-за большой нагрузки узлов коммутации для классов QoS под номерами 0, 2 и 6 величина средней задержки IP-пакетов составляет 25 мс. Предположим, что при установлении междугородных соединений удастся договориться с Операторами других местных сетей о средней задержке IP-пакетов в 15 мс (для тех же классов QoS). В этом случае будет обеспечиваться нормированный показатель $IPTD$.

Методы расчета производительности узла коммутации можно – условно – разделить на три типа:

- оценочный;
- близкий к точному;
- точный.

Все положения данного параграфа, сформулированные выше, относятся, в основном, к оценочному методу, так как погрешность расчета всех исследуемых величин составляет

десятки процентов. Иногда такой точности достаточно для принятия решений в силу модульности пропускной способности транспортных ресурсов и производительности оборудования коммутации. Если необходимы более точные результаты, то следует более тщательно провести декомпозицию показателей QoS, а также использовать иной подход к расчету производительности узла коммутации.

Декомпозицию показателей $IPTD$, $IPDV$ и $IPLR$ можно выполнить, следуя как положениям уже упоминавшихся рекомендаций МСЭ Y.1540, Y.1541 и Y.1542, так и решениям, которые должны быть согласованы Операторами связи в части структуры ССП и обеспечения установленных норм.

При решении всех возникающих задач необходимо учитывать накопленный опыт. В частности, очень полезна статистика эксплуатируемых IP сетей. Интересные сведения приведены, например, в [112]. Для городского фрагмента пакетной сети средняя задержка составила всего 9 мс, но в процессе измерения трафика была зафиксирована и пиковая величина, равная 1058 мс. Это означает, что размах распределения длительности задержки IP-пакетов был весьма существенен. Похожая ситуация наблюдалась для $IPLR$. Среднее значение составило 0,14%, но для максимального уровня трафика величина $IPLR$ достигла 50%.

В статье [113] содержатся данные о гарантированных показателях QoS в IP сетях двух Операторов связи в Северной Америке – AT&T и QWEST. Они воспроизведены в таблице 3.18. Знак "/" разделяет нормы для Операторов AT&T и QWEST соответственно. Приведенные нормы обеспечиваются при связи в пределах США. Операторы нормируют четыре класса обслуживания. Они основаны на классификационных признаках, которые не совпадают с таксонами, принятыми МСЭ в рекомендации Y.1541.

Таблица 3.18. Показатели QoS Операторов связи AT&T и QWEST

Класс обслуживания	Средняя задержка	Доля потерянных пакетов	Джиттер
I	39 мс / 25 мс	0,1% / 0,5%	1 мс / 2 мс
II	39 мс / 25 мс	0,1% / 0,5%	Нет данных / 2 мс
III	39 мс / 25 мс	0,1% / 0,5%	Нет данных / 2 мс
IV	39 мс / нет данных	0,1% / 0,5%	Нет данных

Авторы работы [113] констатируют, что лучшими показатели были признаны нормы AT&T. Очевидно, такой вывод был обусловлен двумя соображениями. Во-первых, у обоих Операторов приняты более "жесткие" нормы на $IPTD$ и $IPDV$, чем требует МСЭ. По этой причине различие в номиналах обеспечиваемых показателей $IPTD$ и $IPDV$ (здесь у Оператора связи QWEST есть преимущество) не столь существенно. Показатель $IPLR$, который поддерживает Оператор связи AT&T, полностью соответствует требованиям МСЭ. Он в пять раз ниже, чем у конкурента.

Если руководствоваться теми соображениями, которые мотивировали Операторов связи AT&T и QWEST выбрать показатели QoS, то целесообразно использовать подход к расчету производительности узлов коммутации ССП, который предложено именовать как "близкий к точному". Более точно вычисленные величины производительности всех узлов коммутации позволят предложить проектные решения, близкие к оптимальным. Правда, упоминавшиеся соображения о необходимости наличия *запаса* пропускной способности транспортных ресурсов и производительности оборудования коммутации могут свести к минимуму ожидаемый полезный эффект. Тем не менее, более точные оценки искомых величин интересны как с теоретической точки зрения, так и для задач, которые косвенно связаны с процессами планирования телекоммуникационной сети и построения системы технической эксплуатации.

Для оценки пропускной способности может использоваться алгоритм, приведенный на рисунке 3.39. Алгоритм основан на последовательности вычислений, итогом которой становится получение величины C_j – производительности $j-го$ узла коммутации.

Рисунок 3.39. Алгоритм оценки пропускной способности узла коммутации

Два верхних прямоугольника, стоящих рядом, определяют условия поставленной задачи. На основании положений, изложенных в монографии, или иных сведений должны быть установлены:

- показатели QoS для $j-го$ узла коммутации в виде совокупности значений $IPTD_i(j)$, $IPDV_i(j)$ и $IPLR_i(j)$, учитывающих все используемые Оператором связи классы обслуживаемого трафика;
- характеристики входящего потока IP-пакетов всех классов QoS, заданных, например, в виде набора функций распределения $A_i(t)$.

Следующий шаг – разработка математической модели $j-го$ узла коммутации. В результате узел коммутации представляется в виде СМО, для которой следует задать все необходимые атрибуты. В частности, должны быть рассчитаны требуемые параметры как для входящего трафика, так и для средств его обслуживания, а также выбрана дисциплина обработки IP-пакетов.

Далее на основании аналитических методов, приведенных в монографии и в других источниках, или при помощи имитационного моделирования вычисляются требуемые значения интенсивности обслуживания трафика в виде набора μ_{ijk}. Нижний индекс "i" определяет класс QoS. Последний индекс "k" указывает на вид нормируемого показателя. Будем считать, что $k=1$ соответствует показателю $IPTD$, $k=2$ – $IPDV$ и $k=3$ – $IPLR$. Каждый из этих трех показателей определяет ту величину интенсивности обслуживания, которая необходима для его поддержки.

Очевидно, что выбор максимального значения μ_j из совокупности рассчитанных значений μ_{ijk} гарантирует выполнение *всех* заданных показателей QoS. Именно по этому номиналу интенсивности обслуживания следует выбрать производительность $j-го$ узла коммутации – величину C_j.

Использование предложенного алгоритма для всех узлов коммутации в составе ССП позволяет завершить процесс планирования коммутируемой сети. После оценки значений

C_j целесообразно провести анализ полученных результатов. Его можно рассматривать как оценку проектных решений.

3.4.4. Об оценке проектных решений

В монографии несколько раз упоминалось об использовании сценарного подхода в процессе планирования телекоммуникационной сети. Сценарии обычно отличаются друг от друга функциональными возможностями, перечнем поддерживаемых услуг и затратами на реализацию проекта. Один из возможных подходов к оценке проектных решений был показан на рисунке 3.29. Он основан на построении многоугольников и формализованном анализе его свойств. Подобное решение может быть рекомендовано с учетом того, что с практической точки зрения постановка задачи по оценке проектных решений не столь проста, как представляется на первый взгляд. Если вернуться к начальной стадии работы над проектом, то следует признать, что и составление корректного ТЗ в настоящее время, когда инфокоммуникационная система меняется очень быстро, является сложной задачей.

Для оценки сложных проектных решений перспективным подходом представляется использование экспертных систем [114], которые основаны на когнитивных технологиях [115 – 117]. Когнитивные технологии могут стать весьма эффективными для следующих операций по разработке и оценке проектных решений [116]:

- постановка вопросов, требующих исследования;
- решение плохо формализованных задач, которые можно отнести к разряду творческих;
- выявление и эффективное использование имеющегося потенциала в составе инфокоммуникационной системы.

Использование когнитивных технологий, вне всякого сомнения, перспективно и для планирования сети в целом, но начать их применение, по всей видимости, следует с оценки проектных решений. Это утверждение обусловлено двумя причинами. Во-первых, в процессе оценки проектных решений необходимо учитывать множество факторов. В то же время, человек в состоянии учитывать одновременно не более пяти-семи факторов [118]. Во-вторых, реализация перспективной экспертной системы для оценки проектных решений потребует не столь существенных затрат (времени и финансовых средств) по сравнению с созданием когнитивной системы планирования сети. С другой стороны, в процессе создания таких экспертных систем будет накоплен опыт, который очень важен для разработки пакета программ по планированию телекоммуникационной сети.

Для успешной работы упомянутой экспертной системы очень заманчиво создать базу данных, содержащую информацию о реализованных проектах в стране. Такая база данных еще до появления экспертной системы станет полезной для решения задач по планированию телекоммуникационных сетей. Информация, содержащаяся и обновляемая в базе данных, особенно актуальна на начальном этапе модернизации эксплуатируемых сетей на базе концепции ССП. В это время опыт проектных институтов основан, скорее, на интуитивных представлениях, а не на строгих экономико-математических методах.

По всей видимости, в ближайшие годы оценку проектных решений лучше проводить на основе метода Делфи [73]. Использование возможностей Internet позволяет быстро обмениваться большими объемами информации. Это сокращает основной недостаток метода Делфи, выражавшийся в росте времени на экспертизу проектов, пересылаемых по обычной почте.

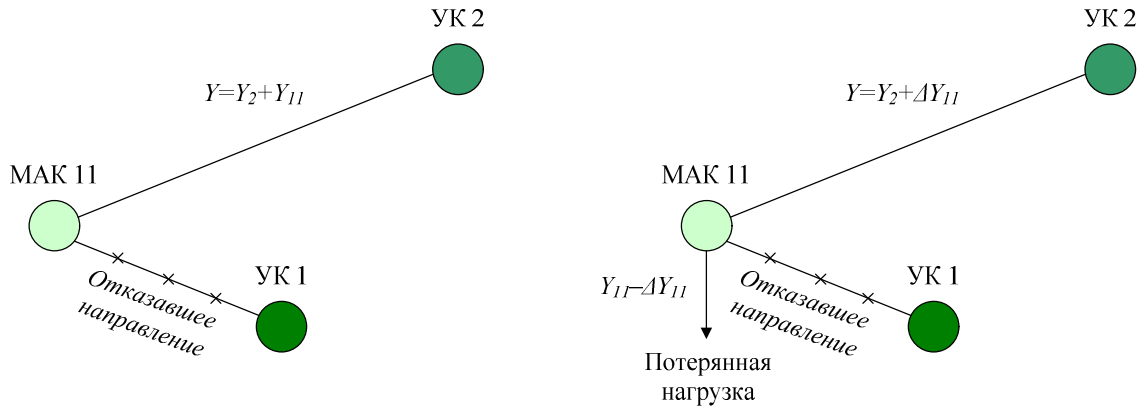
Если я рассуждаю логично, это значит только то, что я не сумасшедший, но вовсе не доказывает, что я прав.
(Иван Павлов)

3.5. Дополнения к третьей главе

3.5.1. Оценка пропускной способности при резервировании ресурсов

В параграфе 2.3.8 приведены оценки пропускной способности, которые необходимы для резервирования транспортных ресурсов в сети доступа. Используемые решения не связаны с требованиями по увеличению производительности узлов коммутации. В ряде случаев для выносных модулей предусмотрена возможность переключения в другой узел коммутации. Пример такой ситуации был показан на рисунке П5.12 в пятом Приложении. В подобных случаях возникает задача оценки величины пропускной способности, которая необходима при резервировании ресурсов.

Возможны различные подходы к переключению выносных модулей, но их можно свести к двум основным вариантам, показанным на рисунке 3.40. Первый вариант основан на возможности обслуживания всего трафика переключаемого выносного модуля. Второй вариант предусматривает ограничение трафика, который поступает по резервируемому направлению. Предполагается, что ограничение может быть выполнено двумя способами: переключением только части пользователей или обслуживанием IP-пакетов определенных классов QoS. Функции выносного модуля в рассматриваемой модели выполняет МАК11. В нормальных условиях эксплуатации МАК11 включен в УК1. В том случае, когда тракт обмена IP-пакетами между УК1 и МАК11 находится в состоянии отказа, обслуживание трафика осуществляется в УК2.



а) Первый вариант переключения выносного модуля из УК1 в УК2

б) Второй вариант переключения выносного модуля из УК1 в УК2

Рисунок 3.40. Два варианта переключения выносного модуля

Величина трафика, обслуживаемого МАК11, составляет Y_{11}. Для первого варианта величина трафика, обслуживаемого УК2 – Y, равна $Y_2 + Y_{11}$. Первое слагаемое в данной сумме определяет трафик, который обрабатывается в УК2 до наступления отказа. Это не означает, что пропускная способность УК должна рассчитываться для трафика $Y_2 + Y_{11}$. По всей видимости, до восстановления отказа допускается некоторое снижение показателей QoS. Такое решение может оказаться вполне приемлемым, если соблюдается следующее условие: $Y_2 >> Y_{11}$. Тогда естественный запас пропускной способности УК2 может почти полностью демпфировать рост трафика.

Второй вариант следует использовать, если условие $Y_2 >> Y_{11}$ не выполняется. Тогда дополнительный трафик, который будет обрабатывать УК2, равен ΔY_{11}. Это означает, что величина потерянного трафика составляет $Y_{11} - \Delta Y_{11}$. Для реализации рассматриваемого

варианта необходимо разработать метод оценки величины ΔY_{11}. Как было сказано выше, потерянная нагрузка может возникать по двум причинам. Во-первых, часть пользователей (как правило, определяемую заранее) придется отключить до ликвидации последствий отказа. Во-вторых, до восстановления работоспособности может быть принято другое решение: обслуживаются только IP-пакеты некоторых (высших) классов QoS.

В результате оценки пропускной способности $j-го$ узла коммутации, независимо от способа ее получения, определяется искомая величина C_j. Оборудование коммутации ССП любой компании включает в свой состав несколько схожих видов, различающихся между собой величиной производительности. В линейке оборудования $k-ой$ компании всегда можно найти два узла коммутации с величинами производительности C_d^k и C_{d+1}^k соответственно, для которых будет справедливо следующее неравенство:

$$C_{d+1}^k < C_j < C_{d+1}^k. \tag{3.33}$$

В качестве рекомендуемого решения, которое выбирается в процессе планирования сети, используется узел коммутации с пропускной способностью C_{d+1}^k. Для обслуживания дополнительного трафика, который формируется при резервировании ресурсов, можно – *без снижения показателей QoS* – выделить пропускную способность, обозначаемую далее как C_r. Она определяется очевидным соотношением:

$$C_r = C_{d+1}^k - C_j. \tag{3.34}$$

Далее необходимо решить задачу, которую можно считать обратной по отношению к рассматриваемым в монографии. Необходимо по уже известной величине пропускной способности C_r найти либо максимальное количество источников трафика, либо уровень приоритета – i, ниже которого IP-пакеты не обслуживаются. Все соотношения, которые необходимы для получения ответов на эти вопросы, можно найти в тексте монографии.

С практической точки зрения решение рассматриваемой задачи очень интересно для периода времени – x, длительность которого следует считать случайной величиной. Для этого периода времени некоторые оценки, используемые в данном параграфе, необходимо рассматривать как величины, которые зависят от времени. Для дополнительного трафика – $\Delta Y_{11}(t)$ может быть выделена пропускная способность – $C_r(t)$, величина которой будет меняться в течение периода времени – $(0, x)$.

Для решения задач подобного рода целесообразно использовать алгоритмы, которые основаны на когнитивных технологиях [117]. Применение когнитивных технологий для планирования и технической эксплуатации перспективных телекоммуникационных сетей, по всей видимости, будет основным направлением прикладных научных исследований в отрасли "Связь".

3.5.2. Новые возможности использования штрафных функций

Для решения некоторых оптимизационных задач используется метод штрафных функций [119]. Штрафные функции (*penalty functions*) играют роль вспомогательных. Они позволяют упростить процесс исследования сложной системы. Он сводится к решению задачи по нахождению безусловного экстремума суммы двух функций: $f_1(x, a_1, ..., a_m)$ и $f_2(x, b_1, ..., b_n)$. Первая функция называется целевой, а вторая – штрафной.

Методы решения поставленной задачи хорошо проработаны в научно-технической литературе, но принципы выбора штрафной функции вида $f_2(x, b_1, ..., b_n)$ для большинства практических задач не ясны. Вероятно, по этой причине метод штрафных функций пока не нашел применения в процессе планирования сети.

В последние годы ситуация изменилась благодаря введению соглашений SLA. Для их практической реализации была введена система штрафов [120, 121]. Например, при превышении длительности задержки IP-пакета на Z мс взимается штраф в размере D рублей. На рисунке 3.41, который заимствован из [120], показана зависимость величины штрафа, выплачиваемого зарубежным Оператором связи клиентам, которые заключили с ним соглашение SLA. Аргументом x для штрафной функции вида $f_2(x, b_1, ..., b_n)$ в данном случае служит длительность простоя, определяемого для ИПС.

Рисунок 3.41. Зависимость штрафа от времени простоя

Вид штрафной функции, показанный на рисунке 3.41, будет, по всей видимости, типичным для тех случаев, когда ось ординат используется для переменной, напрямую связанной с деньгами. Способ определения штрафной функции при помощи гистограммы существенно упрощает решение задачи поиска экстремума. Однако более важен тот факт, что штрафная функция приобретает ясный физический смысл. Данные обстоятельства позволяют расширить область применения экономико-математических методов в задачах планирования телекоммуникационных сетей.

3.5.3. Термины в современной электросвязи

Каждая наука имеет сложившуюся систему терминов, но не всегда специалисты, работающие над одними вопросами, "говорят на одном языке". Тому есть объективные и субъективные причины. Типичным примером объективных причин может служить плохо разработанный нормативный документ, утвержденный в установленном порядке. В одном из документов такого рода, выпущенных более тридцати лет назад, запрещались термины "модем" и "терминал". Вместо них следовало использовать словосочетания "устройство преобразования сигналов – УАС" и "оконечное оборудование данных – ООД". Вскоре стало очевидно, что новые термины "не приживутся". Среди субъективны причин следует выделить два аспекта: разные точки зрения на лучшее название и непонимание важности разработки стройной системы терминов.

Среди отрицательных последствий появления Internet можно уверенно назвать не только используемый набор терминов, но и сам язык публикаций в отрасли "Связь". Такая ситуация характерна для любого этапа качественного изменения инфокоммуникационной системы. Процесс формирования ССП затрагивает телекоммуникационные сети разного назначения. В каждой из этих сетей используется своя терминология. Очевидно, что для разработки общего понятийного аппарата потребуется время и значительные усилия.

Мне представляется, что вопросы создания отечественной терминологии становятся очень актуальными, так как большинство специалистов все чаще используют в статьях и книгах англоязычные "кальки" либо слова, употребление которых нельзя считать удачным с точки зрения правил отечественной грамматики. Не совсем понятно использование очень многими авторами слова "сервис" вместо терминов "услуга" или "обслуживание", широко распространенных в отечественной литературе. Тем более, когда слово "сервис" употребляется во множественном числе вопреки канонам русского языка.

При разработке терминов для эпохи ССП базовыми источниками можно считать три вида публикаций:

- словарь терминов и сокращений, размещенный на официальном сайте МСЭ;
- статьи и монографии отечественных авторов, написанные хорошим русским языком (желательно, чтобы эти работы прошли рецензирование и проверку у профессиональных редакторов);
- работы зарубежных специалистов, свидетельствующие не только о знании предмета, но и о корректном использовании терминов.

В тексте монографии используется ряд терминов, которые следует рассматривать как авторский перевод некоторых устоявшихся словосочетаний, принятых в документах МСЭ. В частности, во второй главе часто употребляется термин "линия передачи" – transmission link. Правда, основанием для выбора термина "линия передачи" послужил еще и тот факт, что данное словосочетание ввели авторитетные специалисты при разработке руководящих документов по созданию единой автоматизированной сети связи [2, 3].

В отечественной технической литературе по телефонной связи используются разные названия для коммутационных станций, применяемых в ГТС и в СТС. Такой подход не представляется удачным. По этой причине в монографии предложен единый термин – "местная станция". Он соответствует термину "local exchange" в технической литературе на английском языке.

По всей видимости, ряду читателей не придется по вкусу термин "узел коммутации", часто используемый в третьей главе монографии. Действительно, большинство авторов предпочитает оперировать термином "маршрутизатор", хотя он не отражает ряд функций, выполняемых соответствующими аппаратно-программными средствами. Выбор в пользу "узла коммутации" был обусловлен двумя соображениями. Во-первых, этот термин можно считать универсальным для всех видов телекоммуникационных сетей и инвариантным по отношению к используемым технологиям. Во-вторых, ССП будет формироваться за счет модернизации сетей телефонной связи, что позволяет считать понятийный аппарат ТФОП приоритетным.

Литература к Главе 3

Использованные источники

1. Н.А. Соколов. Процессы конвергенции, интеграции и консолидации в современной телекоммуникационной системе. – Connect! Мир связи, 2007, №10.
2. Г.Б. Давыдов, В.Н Рогинский, А.Я. Толчан. Сети электросвязи. – М.: Связь, 1977.
3. В.Н. Рогинский, А.Д. Харкевич, М.А. Шнепс, Г.Б. Давыдов, А.Я. Толчан. Теория сетей связи: – М.: Радио и Связь, 1981.
4. Р. Аалдерс. ИТ аутсорсинг: Практическое руководство. – М.: издательство "Альпина бизнес Букс", 2004.
5. В.И. Нейман, Д.А. Селезнев. Интернет-телефония и перспективы ее развития. – Электросвязь, №1, 2008.
6. Д. Стейнбок. Мобильная революция. – Днепропетровск: "Баланс Бизнес Букс", 2006.
7. Л.Е. Варакин. Цифровой разрыв в глобальном информационном обществе. – М.: Международная Академия Связи, 2004.

8. CCITT/GAS 9. Economic and technical aspects of the transition from analogue to digital telecommunication network. – Geneva, 1984.
9. P. Rappoport, L.D. Taylor, D. Kridel, J. Alleman. The demand for Voice over IP – An econometric analysis using survey data on willingness-to-pay. – Telektronikk, Volume 100, No. 4, 2004.
10. В. Шульцева. 2007-й в объективе аналитиков. – ИнформКурьер-Связь, №12, 2007.
11. С.А. Саркисян. Прогнозирование развития больших систем. – М.: Статистика, 1975.
12. Д. Ханк, Д. Уичерн, А. Райтс. Бизнес-прогнозирование. – М.: издательский дом "Вильямс", 2003.
13. B. T. Olsen, K. Stordahl. Model for forecasting cost evolution of components and technologies. – Telektronikk, Volume 100, No. 4, 2004.
14. L.K. Vanston, R.L. Hodges. Technology forecasting for telecommunications. – Telektronikk, Volume 100, No. 4, 2004.
15. Т. Корн, Г. Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984.
16. Г.В. Вемян. Передача речи по сетям электросвязи. – М.: Радио и связь, 1985.
17. ITU-T. Network Performance Objectives for IP-Based Services. Recommendation Y.1541. – Geneva, 2006.
18. В США средняя скорость широкополосного доступа практически не растет. – http://www.tssonline.ru/newstext.php?news_id=48363.
19. А.М. Горнак. Особенности архитектуры фиксированного широкополосного доступа. – Технологии и средства связи, №4, 2006.
20. FTTH Worldwide Market & Technology Forecast, 2006–2011. – Heavy Reading Report, June 2006.
21. Ф. Котлер. Маркетинг, Менеджмент. – СПб.: "Питер", 2005.
22. Н.П. Резникова. Маркетинг в телекоммуникациях. – М.: Эко-Трендз, 2002.
23. И.Г. Бакланов. SDH → NGSDH: Практический взгляд на развитие транспортных сетей. – М.: Метротек, 2006.
24. Н.А. Соколов. Телекоммуникационные сети. – М.: Альварес Паблишинг, 2004.
25. N. Sokolov, A. Alter. Broadband Wireless Access and Communications Reliability Provision. – Proceedings of the Moscow International Conference "Broadband Russia & CIS Summit", Moscow, 2004.
26. В. Вишневский, С. Портной, И. Шахнович. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. – М.: Техносфера, 2009.
27. В.В. Глущенко. Прогнозирование. – М.: Вузовская книга, 2000.
28. С.И. Шелобаев. Экономико-математические методы и модели. Второе издание. – М.: Юнити-Дана, 2005.
29. К. Браммер, Г. Зиффлинг. Фильтр Калмана-Бьюси. – М.: Наука, 1982.
30. http://www.levada.ru.
31. Л.Е. Варакин. Распределение доходов, технологий и услуг. – М.: МАС, 2002.
32. Ю.В. Яковец. Циклы. Кризисы. Прогнозы. – М.: Наука, 1999.
33. Н.А. Соколов. Задачи перехода к сети связи следующего поколения. – Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. СПбГУТ, 2006.
34. Ю.А. Воронин. Теория классифицирования и ее приложения. – Новосибирск: Наука, 1985.
35. J. Hills. Telecommunications and Democracy: the International Experience. – Telecommunication Journal, Vol. 60, №I, 1993.
36. Н.А. Соколов Эволюция задач проектирования телекоммуникационных сетей. – Connect! Мир связи, 2008, №5.
37. Е.Т. Гайдар. Долгое время. Россия в мире: очерки экономической истории. М.: издательство "Дело", 2005.

38. В.И. Данилов-Данильян, М.Ч. Залиханов, К.С. Лосев. Экологическая безопасность. Общие принципы и российский аспект. – М.: издательство МНЭПУ, 2001.
39. Х. Таха. Введение в исследование операций. – М.: издательский дом "Вильямс", 2007.
40. A.R. Modarressi, S. Mohan. Control and Management in Next-Generation Networks: Challenges and Opportunities. – IEEE Communications Magazine, October 2000.
41. А.В. Аттетков, С.В. Галкин, В.С. Зарубин. Методы оптимизации. – М.: издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001.
42. Н.А. Соколов. Семь аспектов развития сетей доступа. – Технологии и средства связи. Специальный выпуск "Системы абонентского доступа", 2005.
43. В.Д. Москвитин. Построение и функционирование сетей верхнего уровня ЕСЭ РФ в условиях многооператорской среды. – Инфоком. Труды МАС, 2005, №1.
44. Т.М. Калашникова. Экономическое районирование. – М.: МГУ, 1982.
45. А.С. Миков, Н.А. Соколов. Региональные сети электросвязи. – Вестник связи International, 1999.
46. Р. Кох, Г. Яновский. Эволюция и конвергенция в электросвязи. – М.: Радио и связь, 2001.
47. ITU-T. Information technology – Open Systems Interconnection – Basic reference model: The basic model common text with ISO/IEC. Recommendation X.200. – Geneva, 1994.
48. И.Г. Олифер, Н.А. Олифер. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. 2-е издание. – СПб.: издательство "Питер", 2003.
49. S. Halabi. Metro Ethernet (Networking Technology). – Cisco Press core series, 2008.
50. А. Филимонов. Построение мультисервисных сетей Ethernet. – СПб.: БХВ, 2007.
51. L. Tauro, C. Palmer, G. Siganos, and M. Faloutsos. A simple conceptual model for the Internet topology. – IEEE Global Internet, November 2001.
52. А.Б. Гольдштейн, Б.С. Гольдштейн. Softswitch. – СПб.: БХВ, 2006.
53. С.В. Журавлев. Опыт перехода сетей связи на пакетные технологии. – Вестник связи, №12, 2007.
54. Н.А. Соколов. Перспективы использования выносных модулей. – Connect! Мир связи, 2008, №10.
55. Ф. Харари. Теория графов. – М.: Эдиториал УРСС, 2003.
56. В.К. Попков. Математические модели связности. – Новосибирск, издательство ИВМиМГ СО РАН, 2006.
57. Н.А. Соколов, Р.Д. Рерле. Управление емкостью пучка в цифровых кроссовых узлах. – Труды четвертого международного семинара по теории телетрафика и компьютерному моделированию (МСТТКМ-4), Москва, 1992.
58. В.И. Комашинский, Д.А. Смирнов. Нейронные сети и их применение в системах управления связи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003.
59. Л.А. Козлов. Когнитивное моделирование на ранних стадиях проектной деятельности: учебное пособие. – Барнаул: издательство АлтГТУ, 2008.
60. Я.С. Дымарский. Задачи и методы оптимизации сетей связи. – СПб.: издательство СПбГУТ, 2005.
61. В.М. Казиев. Введение в анализ, синтез и моделирование систем. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.
62. O.W. McAleer. Meeting Canadian Customer Needs through Advanced Switching Technologies. – ISS’92. Proceedings.
63. Telecom Italia внедряет крупнейшую в Европе сеть VoIP с Cisco и Italtel. – Компьютерная телефония, 2002, №5.
64. В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев, А.Б. Юрчук. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура. – М.: Эко-Трендз, 2010.
65. N. Ghazisaidi, M. Maier, C. Assi. Fiber-Wireless (FiWi) Access Networks: A Survey. – IEEE Communications Magazine, February, 2009.

66. N. Ghazisaidi, M. Maier. Fiber-Wireless (FiWi) Access Networks: Challenges and Opportunities. – IEEE Network, vol. 25, 2011, No 1.
67. В.И. Комашинский, Н.А. Соколов. Концепция 2Э: новый подход к модернизации системы сельской связи. – Connect! Мир связи, №9, 2011.
68. R.E. Mosher Bell and Rural Telecom in U.S. – Telephony, March 12, 1979.
69. Engineering an Operations in the Bell System / Prepared by Member of the Technical Staff and the Technical Publication Department AT&T Bell Laboratories; R.F. Rey, Technical Editor. – AT&T Bell Laboratories, Murray Hill, N.J., 1983.
70. С.В. Богданов. Умный дом. – СПб: Наука и техника, 2003.
71. Р.Г. Баранцев. Синергетика в современном естествознании. М.: Едиториал УРСС, 2003.
72. А. Ночивелли. Полимерные волокна – универсальный оптический доступ. – Lightwave. Russian Edition, 2006, №3.
73. H.A. Linstone. The Delphi Method. Techniques and Application. – New Jersey Institute of Technology, 2002.
74. А.В. Пинчук, Н.А. Соколов. Прагматическая стратегия перехода к NGN. – Вестник связи, 2006, №6.
75. Д.С. Гулевич. Сети связи следующего поколения. – М.: Интернет-Университет Информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007.
76. И.Г. Бакланов. NGN: принципы построения и организации. – М.: Эко-Трендз, 2008.
77. С.А. Юдицкий, П.Н. Владиславлев. Основы предпроектного анализа организационных систем. – М.: Финансы и статистика, 2005.
78. А.А. Новоселов. Математическое моделирование финансовых рисков. Теория измерений. – Новосибирск, Наука, 2001.
79. Telecommunications Optimization: Heuristic and Adaptive Techniques. Edited by D.V. Corne, M.J. Oates, G.D. Smith. – John Wiley & Sons, Ltd, 2000.
80. Н.А. Соколов. Эволюция местных телефонных сетей. – Пермь: издательство "Книга", 1994.
81. K. Wieland. FTTx roadblocks in Europe. – Telecommunications International, June, 2006.
82. J. Barthold. U.S. telcos bet on video quality. – Telecommunications International, August 2007.
83. http://www.telegeography.com/cu/article.php?article_id=29991&email=html.
84. http://www.telegeography.com/cu/article.php?article_id=21850&email=html.
85. Е. Евдокимов, М. Суханова. Германия и Британия переходят на VoIP. – Сетевой журнал, №7-8, 2004.
86. С. Илич. FTTC: решение для широкополосных сетей доступа с минимальной стоимостью. – Вестник связи, 2010, №10.
87. http://www.telegeography.com/products/commsupdate/articles/2011/05/27/bt-reveals-commercial-fttp-launch-delayed-until-late-2011/.
88. http://www.telegeography.com/products/commsupdate/articles/2011/07/06/nbn-examining-telstra-infrastructure/.
89. Г. Башилов. PON: активы и запасы. – Журнал сетевых решений / LAN, апрель 2011.
90. http://www.ftthcouncil.eu.
91. FTTH Handbook. Fiber to the home Council Europe. Fourth Edition, D&O Committee, Revision date: 14/01/2011.
92. B.L. Egan. Improving Rural Telecommunications Infrastructure. – Paper prepared for TVA Rural Studies University of Kentucky.
93. Развитие продолжается: интервью с В.С. Лагутиным. – Connect! Мир связи, №2, 2000.
94. Е.П. Дубровский. Канализационно-кабельные сооружения связи. – М.: Высшая школа, 1991.

95. В.И. Котов. Анализ рисков инвестиционных проектов на основе функций чувствительности и теории нечетких множеств. – СПб.: Судостроение, 2007.
96. Р.Н. Вадзинский. Справочник по вероятностным распределениям. – СПб.: Наука, 2001.
97. ITU-T. Network grade of service parameters and target values for circuit-switched services in the evolving ISDN. Recommendation E.721. – Geneva, 1999.
98. Е.В. Мархай. Основы технико-экономического проектирования городских телефонных сетей. – М.: Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио, 1953.
99. Башарин Г.П., Харкевич А.Д., Шнепс М.А. Массовое обслуживание в телефонии. – М.: Наука, 1968.
100. Б.С. Лившиц, Я.В. Фидлин, А.Д. Харкевич. Теория телефонных и телеграфных сообщений. – М.: Связь, 1971.
101. М.А. Шнепс. Системы распределения информации. Методы расчета: Справочное пособие. – М.: Связь, 1979.
102. Ю.Н. Корнышев, А.П. Пшеничников, А.Д. Харкевич. Теория телетрафика. – М.: Радио и Связь, 1996.
103. Г.П. Башарин. Лекции по математической теории телетрафика. – М.: РУДН, 2009.
104. Сифоров В.И., Башарин Г.П., Лившиц Б.С., Нейман В.И., Харкевич А.Д., Шнепс М.А. Развитие теории телетрафика в Советском Союзе. – В кн. Модели информационных сетей и коммутационных схем. М.: Наука, 1982.
105. Ю.В. Семенов. Проектирование сетей связи следующего поколения. – СПб.: Наука и техника, 2005.
106. С.Н. Степанов. Основы телетрафика мультисервисных сетей. – М.: Эко-Трендз, 2010.
107. ITU-T. Digital exchange performance design objectives. Recommendation Q.543. – Geneva, 1993.
108. ITU-T. Internet protocol data communication service – IP packet transfer and availability performance parameters. Recommendation Y.1540. – Geneva, 2007.
109. Е.С. Вентцель. Теория вероятностей. – М.: издательский центр "Академия", 2005.
110. J. Metzler. Corporative Networks in Transition: Realizing the Value of Private Optical Networks. – Special Report, Network World Inc., 2006.
111. ITU-T. Framework for achieving end-to-end IP performance objectives. Recommendation Y.1542. – Geneva, 2006.
112. L. Chunguang. Development Trends of Telecom Bearer Network. – Annual Review of Communication, Vol. 59, 2007.
113. Б. Бордман, А. Ахмед. Переходим на MPLS. – Сети и системы связи, №13, 2005.
114. Дж. Джарратано, Г. Райли. Экспертные системы: принципы разработки и программирование. – М.: издательский дом "Вильямс", 2007.
115. R.W. Thomas, D.H. Friend, L.A. DaSilva, A.B. MacKenzie. Cognitive Networks: Adaptation and Learning to Achieve End-to-end Performance Objectives. – IEEE Communications Magazine, Vol. 44, №12, 2006.
116. Г.Г. Малинецкий, С.К. Маненков, Н.А. Митин, В.В. Шишов. Когнитивный вызов и информационные технологии. – Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша № 46, 2010.
117. В.И. Комашинский, Н.А. Соколов. Когнитивные системы и телекоммуникационные сети. – Вестник связи № 10, 2011.
118. О.И. Ларичев. Наука и искусство принятия решений. – М.: Наука, 1979.
119. Н.Н. Моисеев. Элементы теории оптимальных систем. – М.: Наука, 1975.
120. П. Иванов. ПроSLАвление услуг связи. – Сети, 2003, № 1-2.
121. О.И. Фаерберг, В.О. Шварцман. Качество услуг связи. – М.: ИРИАС, 2005.

Перечень дополнительной литературы к Главе 3

- Д.В. Долотов, В.Л. Дагович. Мультисервисные УПАТС. – Вестник связи, 2001, №11.
- А.С. Миков. Анализ трафика при проведении "Прямой линии" Президента Российской Федерации. – Электросвязь, № 8, 2004.
- ITU-T. Framework Recommendation on functional access networks. Architecture and functions, access types, management and service node aspects. Recommendation G.902 – Geneva, 1995.
- О. Ибе. Сети и удаленный доступ. – М.: ДМК Пресс, 2002.
- Ю.В. Яковец. Циклы. Кризисы. Прогнозы. – М.: Наука, 1999.
- Л.Н. Иванов, А.Л. Иванов. Методы принятия решений бизнес-плана. Эвристика. – М.: "Приор-издат", 2004.
- ITU-T. Framework of a service level agreement. Recommendation E.860. – Geneva, 2002.
- ITU-D. New Technologies for Rural Applications. – Final Report of ITU-D Focus Group 7, 2000.
- Б.С. Гольдштейн, Н.А. Соколов, Г.Г. Яновский. Сети связи. – СПб.: БХВ, 2010.
- А. Розенберг. Магия шести сигм. – Сети и системы связи, 2005, №7.
- Г.В. Вемян. Передача речи по сетям электросвязи. – М.: Радио и связь, 1985.
- P.E. Green. Fiber to the Home: the New Empowerment. – Wiley-Interscience, 2005.
- М.Ф. Тюхтин. Системы Интернет-телевидения. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008.
- Д. Райли, М. Кринер. NGOSS: Построение эффективных систем поддержки и эксплуатации сетей для оператора связи. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2007.
- R.M. Roberts. Networking Fundamentals. – The Goodheart-Willcox Company Inc., Illinois, 2005.
- Y. Koucheryavy, G. Giambene, D. Staehle, F. Barselo-Arroyo, T. Braun, V. Siris. Traffic and QoS Management in Wireless Multimedia Networks. – Springer Science + Business Media, 2009.
- А.Д. Мышкис. Элементы теории математических моделей. – М.: Книжный дом "Либриком", 2011.
- В.И. Ширяев, Е.В. Ширяев. Принятие решений: Математические основы. Статические задачи. – М.: Книжный дом "Либриком", 2009.
- Е.Б. Алексеев, В.Н. Гордиенко, В.В. Крухмалев, А.Д. Моченов, М.С. Тверецкий. Проектирование и техническая эксплуатация цифровых телекоммуникационных систем и сетей. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008.
- П.Л. Виленский, В.Н. Лившиц, С.А. Смоляк. Оценка эффективности инвестиционных проектов: Теория и практика. – М.: Дело, 2004.
- Б.В. Зверев, Е.П. Зелевич. Социально ориентированные услуги связи. – М.: Радио и связь, 2005.
- Я.С. Дымарский, Н.П. Крутякова, Г.Г. Яновский. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи. – М.: Мобильные коммуникации, 2003.
- В.И. Нейман. Структуры систем распределения информации. – М.: Радио и связь, 1983.
- Ш. Вегешна. Качество обслуживания в сетях IP. – Москва, издательский дом "Вильямс", 2003.
- И.Н. Корнеев, С.Г. Фень. Сетевые структуры телекоммуникационной индустрии. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005.

- В.К. Чаадаев. Бизнес-процессы в компаниях связи. – М.: Эко-Трендз, 2004.
- Ю.Ф. Кожанов. Интерфейсы и протоколы сетей следующего поколения. – СПб.: Альфарет, 2006.

В земные страсти вовлеченный,
я знаю, что из тьмы на свет
однажды выйдет ангел черный
и крикнет, что спасенья нет.
Но простодушный и несмелый,
прекрасный, как благая весть,
идущий следом ангел белый
прошепчет, что надежда есть.
(Булат Окуджава)

Послесловие

Успешное планирование сети электросвязи можно рассматривать как необходимое (но отнюдь не достаточное) условие для создания эффективной инфокоммуникационной системы. Трудоемкость исследований, которые должны быть выполнены для разработки полноценной методики планирования сети в виде пакета программных средств, велика. Затраты на такую работу будут не столь существенными, а ожидаемый экономический эффект – только за счет снижения необходимых инвестиций – значительным.

Это утверждение основано на оценках, которые были получены на предыдущем этапе модернизации инфокоммуникационной системы, когда проходила цифровизация ТФОП. В монографии несколько раз упоминалось об использовании коммутационных станций большой емкости в зарубежных телефонных сетях. Немногим более двадцати лет назад консалтинговой группой "КОНТЕЛ" была выполнена научно-исследовательская работа, цель которой заключалась в выборе оптимальной структуры цифровой ГТС для Северной Столицы. В результате расчетов была получена следующая оценка: применение цифровых МС емкостью 10000 номеров (такой номинал был типичен для аналоговых систем коммутации в отечественных ГТС – и декадно-шаговых, и координатных) ведет к росту инвестиций, как минимум, на 10% по сравнению с оптимальным решением. Для упомянутого проекта оптимальным решением была цифровая коммутационная станция с емкостью в диапазоне 60 – 80 тысяч номеров. Кстати, в Китае работают цифровые МС, обслуживающие 250 тысяч абонентов. Стоимость одного номера цифровой МС двадцать лет назад составляла около 100 долларов США. Это означает, что в расчете на одну АЛ отказ от применения цифровых МС большой емкости увеличил затраты на 10 долларов США. Только при замене 50% аналоговых коммутационных станций (около 20 млн. АЛ) было потрачено напрасно не менее 200 млн. долларов США. Затраты на разработку пакета прикладных программ, позволяющего находить оптимальные решения при планировании цифровых телефонных сетей, вряд ли составили бы более одного процента от возможной экономии.

На одном из сайтов Internet можно найти переиначенную фразу Наполеона: "Народ, который не хочет кормить свою науку, будет кормить чужую армию". Не берусь судить насчет армии, а то, что мы кормим чужую промышленность, не подлежит сомнению. Речь не об импорте, а о разумном расходовании средств на модернизацию сетей электросвязи.

Эта монография была написана без соавторов по ряду соображений. Основная причина состоит в том, что мне уже более пятнадцати лет не встречались публикации, которые были посвящены прикладным исследованиям по тематике "планирование сетей электросвязи". Я не стал искать соавторов. Похоже, что задачами планирования сетей электросвязи теперь уже никто не занимается.

Для научной работы над проблемами такого масштаба нужны финансовые ресурсы, хотя бы для поддержки усилий коллектива специалистов в течение двух-трех лет. Правда, теоретические исследования, которые следует использовать при разработке методики планирования сетей, еще ведутся. И только это вселяет оптимизм.

Уважаемый читатель! Если у Вас возникнут какие-либо вопросы, то напишите мне по адресу: nicksokolov@hotmail.com. Буду очень признателен всем, кто найдет ошибки или опечатки и сообщит мне о них. Исправления и дополнения будут размещаться на сай-

те http://nicksokolov.narod.ru. Такая практика показалась мне удачной после того, как была опубликована предыдущая монография. Некоторые письма содержали интересные мысли и любопытные статистические данные. Хочется верить, что и в этой монографии Вы найдете для себя что-то интересное.

Все вероятности равны 50%.
Либо случится, либо нет.
(Законы Мерфи. Логическое положение Кольварда)

Приложение 1. Теория вероятностей. Преобразование Лапласа-Стилтьеса

Если могут случиться несколько неприятностей, они происходят в самой неблагоприятной последовательности.
(Расширенный закон Мерфи)

П1.1. Основы теории вероятностей

Теория вероятностей – раздел математики, посвященный случайным величинам. Точное определение термина "случайная величина", отвечающее строгим математическим канонам, можно найти в монографиях, которые посвящены фундаментальным основам теории вероятностей [1, 2, 3]. В прикладных дисциплинах иногда используются менее строгие трактовки.

Сначала рассмотрим простой пример, касающийся телефонной связи. Допустим, нас интересует количество абонентов коммутационной станции, которые в данный момент времени говорят по телефону. Если в коммутационную станцию включено L абонентов, то интересующая нас величина (обозначим ее через X) находится в таком диапазоне:

$$0 \le X \le L. \qquad (П1.1)$$

Очевидно, что значение X можно считать случайной величиной. В нашем примере значениями X будут целые положительные числа. Типовая емкость многих городских аналоговых коммутационных станций составляет 10000 номеров. Из практики известно, что ночью – даже при такой большой численности абонентов – можно зафиксировать ситуацию, когда $X = 0$. Правда, шансы обнаружения такого события невелики. Ситуация $X = L$ даже в период наибольшей активности абонентов практически невозможна. В подобных случаях можно руководствоваться принципом *практической уверенности* [3].

Первым признаком случайной величины можно считать то, что заранее неизвестно ее значение в процессе проведения измерения, испытания, опыта или иного действия. В рассматриваемом примере таким действием следует считать измерение трафика. Второй признак – наличие области возможных значений, которые может принимать случайная величина. Для выбранного примера эта область образована множеством целых чисел от 0 до L.

Случайные величины делят на дискретные и непрерывные [4, 5]. Рассматриваемый пример связан с дискретной случайной величиной. Более того, исследуемая величина принимает только значения чисел натурального ряда. Если же измерять не количество разговаривающих абонентов, а время занятия обслуживающих приборов коммутационной станции, то оперировать придется непрерывной случайной величиной.

Дискретный или непрерывный характер случайной величины обычно определяется объективными свойствами исследуемого процесса. С другой стороны, для проведения анализа некоторых систем массового обслуживания (СМО) целесообразно переходить от непрерывных случайных величин к дискретным или наоборот. Этот вопрос подробнее рассматривается в третьем разделе настоящего Приложения.

Вернемся к нашему примеру. Допустим, что мы провели N измерений. При этом ровно K раз численность разговаривающих абонентов (событие A) была одной и той же. Вероятность наступления интересующего нас события – $P(A)$ определяется следующим образом [1, 2, 3]:

$$P(A) = \lim_{N \to \infty} \frac{K}{N}. \qquad (П1.2)$$

Рассмотрим случай, когда в результате проведения 1000 измерений мы 50 раз обнаружили 800 разговаривающих абонентов (событие A). Оценку 0,05, строго говоря, нельзя считать вероятностью $P(A)$, так как число проведенных измерений было конечной величиной. Величину 0,05 называют частотой или частостью.

В теории вероятностей важную роль играют аксиомы, которые сформулированы выдающимся российским математиком А.Н. Колмогоровым [1]. Четыре основные аксиомы приводятся ниже в следующей форме [6]:

а) каждому событию A ставится в соответствие неотрицательное число – его вероятность $P(A) \geq 0$;

б) вероятность достоверного события Ω равна единице – $P(\Omega) = 1$;

в) если A и B представляют собой несовместные события, то вероятность события A или B (оно обычно обозначается как $A + B$) – $P(A + B)$ равна сумме $P(A) + P(B)$;

г) условная вероятность наступления события B, если уже произошло событие A, – $P(B|A)$ определяется как $P(AB) / P(A)$.

Для пояснения термина "условная вероятность" целесообразно использовать две простые геометрические фигуры. Они приведены на рисунке П1.1. Подобный подход позволяет наглядно интерпретировать события и вероятности их наступления.

а) События A и B совместны б) События A и B несовместны

Рисунок П1.1. Геометрическая интерпретация условной вероятности

События A и B заключаются в попадании точки в одноименные области, которые показаны в левой части рисунка П1.1. Событию AB свойственна важная особенность. Оно имеет место, когда события A и B наступают одновременно. Тогда вероятность события B при условии, что уже произошло событие A, представима как отношение площадей AB и A. Если события A и B несовместны, то условная вероятность равна нулю. Последнее утверждение иллюстрирует правый фрагмент рисунка П1.1: площадь пересечения двух областей равна нулю.

Из аксиом теории вероятностей можно сделать ряд важных выводов. В частности, если могут наступить только события A и $\bar{A}$ (противоположное событию A), то всегда справедливы такие соотношения:

$$P(A + \bar{A}) = 1 \text{ или } P(A) = 1 - P(\bar{A}). \qquad (П1.3)$$

Очевидно также, что $0 \leq P(A) \leq 1$. Из аксиомы (в) можно получить более общее соотношение для попарно непересекающихся событий:

$$P(A + B + C + ... + Z) = P(A) + P(B) + P(C) + ... + P(Z). \qquad (П1.4)$$

Полной характеристикой случайной величины служит закон ее распределения. Он устанавливает соответствие между возможными значениями случайной величины и соответствующими вероятностями. Знание закона распределения позволяет сравнительно простыми математическими методами получить оценки случайной величины, важные для практической работы.

Закон распределения может быть представлен разными способами. Для вопросов, которые рассматриваются в этой монографии, основной интерес представляет функция распределения (ФР) случайной величины – $F(t)$. В большинстве учебников по теории вероятностей используется ФР вида $F(x)$, но у нас осью абсцисс чаще будет "Время". Поэтому аргументом ФР служит буква "t", обычно указывающая на время. По всей видимости, такой выбор объясняется тем, что в ряде языков слово "время" начинается с буквы "t". Далее будут рассматриваться случайные величины, определенные для $t \geq 0$. Пример ФР случайной величины показан на рисунке П1.2. Эта функция изменяется на отрезке $[T_{MIN}, T_{MAX}]$.

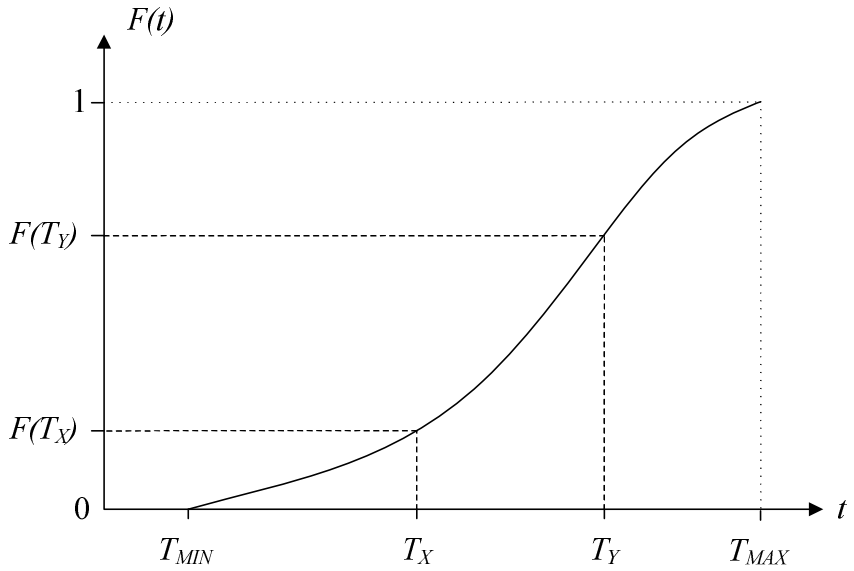


Рисунок П1.2. Функция распределения случайной величины

ФР представляет собой монотонно возрастающую функцию. Она определяется таким соотношением:

$$F(t) = P(T < t). \qquad (П1.5)$$

Иными словами ФР равна вероятности соблюдения неравенства $T < t$. На рисунке П1.2 указаны две точки T_X и T_Y, которым соответствуют вероятности $P(T_X < t)$ и $P(T_Y < t)$. Вероятность того, что случайная величина попадет в интервал (T_X, T_Y), равна разности $F(T_Y) - F(T_X)$. В некоторых случаях практический интерес представляет дополнительная ФР – $P(t \geq T)$. Очевидно, что

$$P(t \geq T) = 1 - F(t). \qquad (П1.6)$$

Следует отметить, что в некоторых публикациях ФР $F(t)$ определяется иначе – нестрогим неравенством:

$$F(t) = P(T \leq t). \qquad (П1.7)$$

Различие в определениях (П1.5) и (П1.7) существенно, в основном, для дискретных случайных величин.

Среди характеристик случайной величины, получаемых из функции $F(t)$, большое практическое значение отводится математическому ожиданию, дисперсии, асимметрии и эксцессу. Математическое ожидание (или среднее значение) случайной величины – $t^{(1)}$ может быть рассчитано по такой формуле:

$$t^{(1)} = \int_0^\infty t dF(t). \qquad (П1.8)$$

В технической литературе встречаются и другие обозначения математического ожидания. Например, можно найти следующие конструкции: $M(T)$, a_1 и $\overline{t}$. В данном Приложении – как равноправные – используются два обозначения для математического ожидания: $t^{(1)}$ и $M(T)$. Предпочтение отдается записи $t^{(1)}$. Цифра в круглых скобках указывает на номер начального момента случайной величины. Математическое ожидание – это первый начальный момент случайной величины. Иногда используют словосочетание "начальный момент первого порядка" [3, 4]. Начальный момент порядка r – $t^{(r)}$ будет определяться следующим соотношением:

$$t^{(r)} = \int_0^\infty t^r dF(t). \qquad (П1.9)$$

В некоторых монографиях используется иная формула для расчета математического ожидания случайной величины – через плотность вероятности $f(t)$. Тогда используется интеграл Римана:

$$t^{(1)} = \int_0^\infty t f(t) dt. \qquad (П1.10)$$

Формула (П1.8), основанная на использовании интеграла Стилтьеса, удобна тем, что она универсальна для непрерывных и дискретных случайных величин. Иными словами, исследуемая случайная величина может быть задана как плотностью распределения, так и рядом распределения. Следует отметить, что случайная величина может не иметь математического ожидания. Для задач, рассматриваемых в монографии, такие ситуации не представляют практического интереса.

Математическое ожидание суммы K случайных величин определяется следующим образом:

$$M\left(\sum_{j=1}^{K} T_j\right) = \sum_{j=1}^{K} t_j^{(1)}. \qquad (П1.11)$$

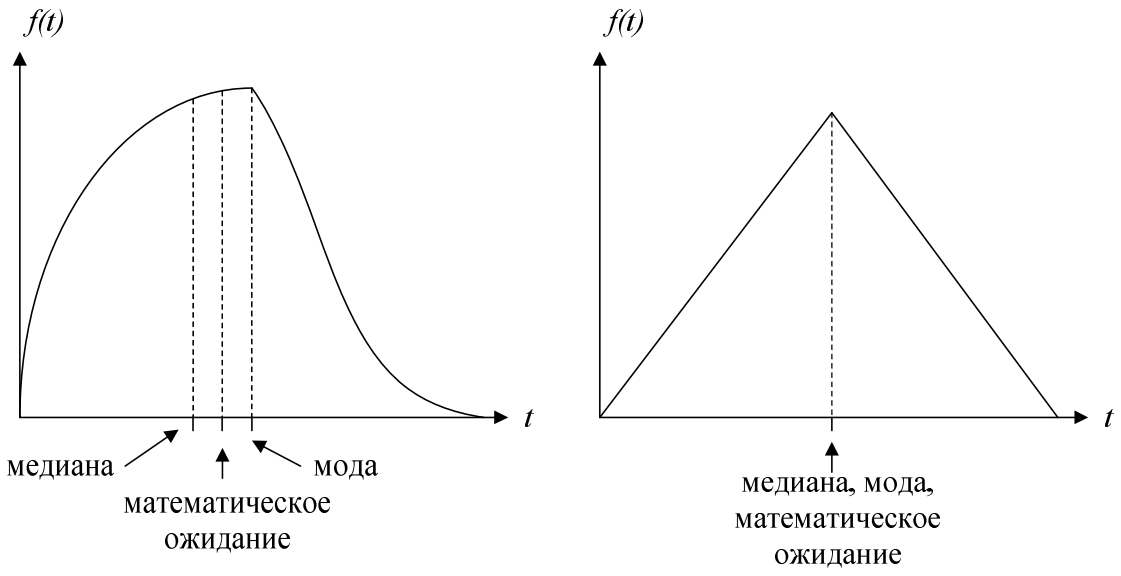
Математическое ожидание произведения K независимых случайных величин может быть вычислено по такой формуле:

$$M\left(\prod_{j=1}^{K} T_j\right) = \prod_{j=1}^{K} t_j^{(1)}. \qquad (П1.12)$$

Математическое ожидание определяет положение центра распределения случайной величины. Для функции $f(t)$ обычно определяют также медиану и моду. Медиана делит площадь под кривой $f(t)$ пополам. Мода непрерывной случайной величины – такое значение t, в котором функция $f(t)$ достигает локального максимума. Если функция $f(t)$ имеет один максимум, то распределение называется унимодальным. Мультимодальное распределение имеет несколько мод. Экспериментальные данные, полученные в процессе измерения трафика, свидетельствуют, что функция $f(t)$ иногда имеет несколько явно выраженных экстремумов.

На рисунке П1.3 показаны два графика функции $f(t)$. Данная функция является унимодальной. В левой части этого рисунка показано распределение, для которого значения математического ожидания, медианы и моды различны. Для функции $f(t)$, изобра-

женной в правой части рисунка П1.3, значения математического ожидания, медианы и моды совпадают.



а) Первый пример функции *f(t)* б) Второй пример функции *f(t)*

Рисунок П1.3. Математическое ожидание, медиана и мода для двух функций $f(t)$

Дисперсия случайной величины – σ^2 характеризует меру рассеяния случайной величины. Дисперсия рассчитывается как математическое ожидание квадрата отклонения случайной величины от своего среднего значения:

$$\sigma^2 = M\left[\left(T - t^{(1)}\right)^2\right]. \qquad (П1.13)$$

Дисперсия является центральным моментом второго порядка – μ_2. Центральный момент порядка r – μ_r определяется таким соотношением:

$$\mu_r = M\left[\left(T - t^{(1)}\right)^r\right]. \qquad (П1.14)$$

Корень квадратный из дисперсии – σ называется среднеквадратическим (или стандартным) отклонением. Отношение среднеквадратического отклонения к среднему значению (при условии, что оно больше нуля) именуется коэффициентом вариации случайной величины – ν:

$$\nu = \frac{\sigma}{t^{(1)}}. \qquad (П1.15)$$

Для начальных и центральных моментов справедливы такие соотношения:

$$t^{(r)} = \sum_{j=0}^{r} C_r^j \mu_{r-j}\left[t^{(1)}\right]^j, \qquad (П1.16)$$

$$\mu_r = \sum_{j=0}^{r} (-1)^j \left[t^{(r-j)}\right]\left[t^{(1)}\right]^j. \qquad (П1.17)$$

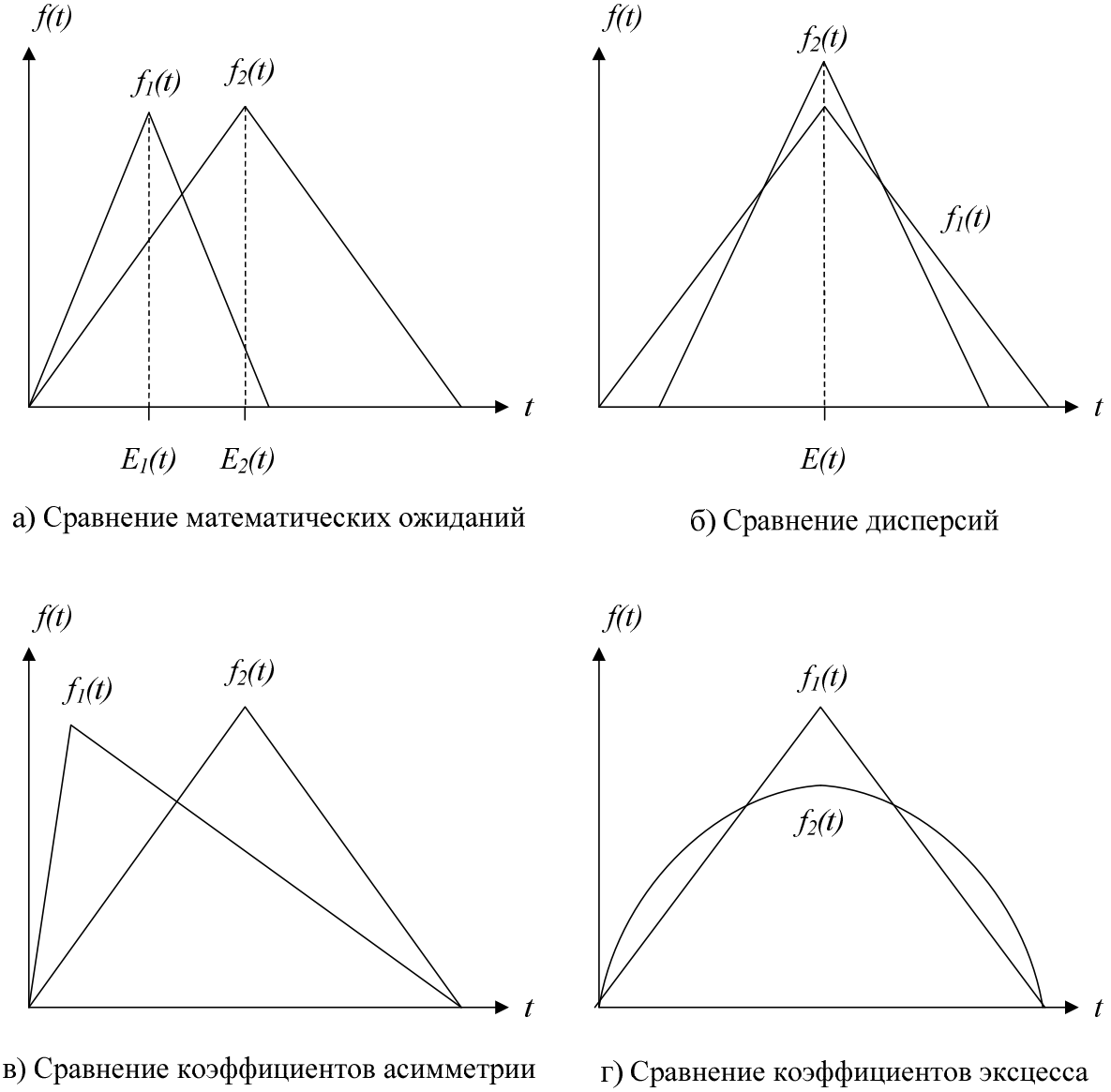
Коэффициент асимметрии распределения случайной величины – γ_1 определяет степень неравномерности плотности вероятности $f(t)$ относительно своего центра. Он рассчитывается по следующей формуле:

$$\gamma_1 = \frac{\mu_3}{\sigma^3}. \qquad (П1.18)$$

Коэффициент эксцесса распределения случайной величины – γ_2 характеризует "островершинность" плотности вероятности $f(t)$. Обычно эту характеристику применяют к унимодальным распределениям. Для вычисления коэффициента эксцесса используется такое выражение:

$$\gamma_2 = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3. \qquad (П1.19)$$

На рисунке П1.4 приведены четыре примера непрерывных распределений. Для всех этих примеров показаны две функции $f(t)$, различающиеся между собой следующими параметрами: средним значением, дисперсией, коэффициентом асимметрии и эксцессом.



а) Сравнение математических ожиданий

б) Сравнение дисперсий

в) Сравнение коэффициентов асимметрии

г) Сравнение коэффициентов эксцесса

Рисунок П1.4. Четыре примера непрерывных распределений

Для варианта (а) справедливо такое соотношение: $t_2^{(1)} > t_1^{(1)}$. Иными словами, среднее значение случайной величины будет больше для распределения с плотностью $f_2(t)$. Следующий пример иллюстрирует функции $f_1(t)$ и $f_2(t)$ с одинаковым значением математического ожидания, но с различной дисперсией. Для функции $f_1(t)$ дисперсия больше. Меньшая величина асимметрии свойственна распределению $f_2(t)$ – вариант (в). Вариант

(г) содержит два распределения, которые различаются "островершинностью". Большим коэффициентом эксцесса обладает функция $f_1(t)$.

Кроме начальных и центральных моментов следует упомянуть кумулянты. Они в ряде публикаций называются семиинвариантами. С их помощью можно определить закон распределения вероятностей [7]. Кумулянт первого порядка – χ_1 представляет собой математическое ожидание случайной величины. Кумулянты более высоких порядков – χ_j $(j > 1)$ связаны с центральными моментами следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}
&\mu_2 = \chi_2, \\
&\mu_3 = \chi_3, \\
&\mu_4 = \chi_4 + 3\chi_2^2, \\
&\mu_5 = \chi_5 + 10\chi_3\chi_2, \\
&\mu_6 = \chi_6 + 15\chi_4\chi_2 + 10\chi_3^2 + 15\chi_2^3, \\
&\mu_7 = \chi_7 + 21\chi_2\chi_5 + 35\chi_4\chi_3 + 105\chi_3\chi_2^2
\end{aligned} \qquad \text{(П1.20)}$$

Математическое ожидание и дисперсия случайной величины, которые считаются ее основными характеристиками, являются кумулянтами χ_1 и χ_2 соответственно. В [7] приведены также соотношения между кумулянтами и начальными моментами.

С точки зрения вопросов, рассматриваемых в монографии, важной характеристикой ФР служит квантиль. На рисунке П1.5 показаны два квантиля, для которых значения ФР составляют 0,5 и 0,95 соответственно.

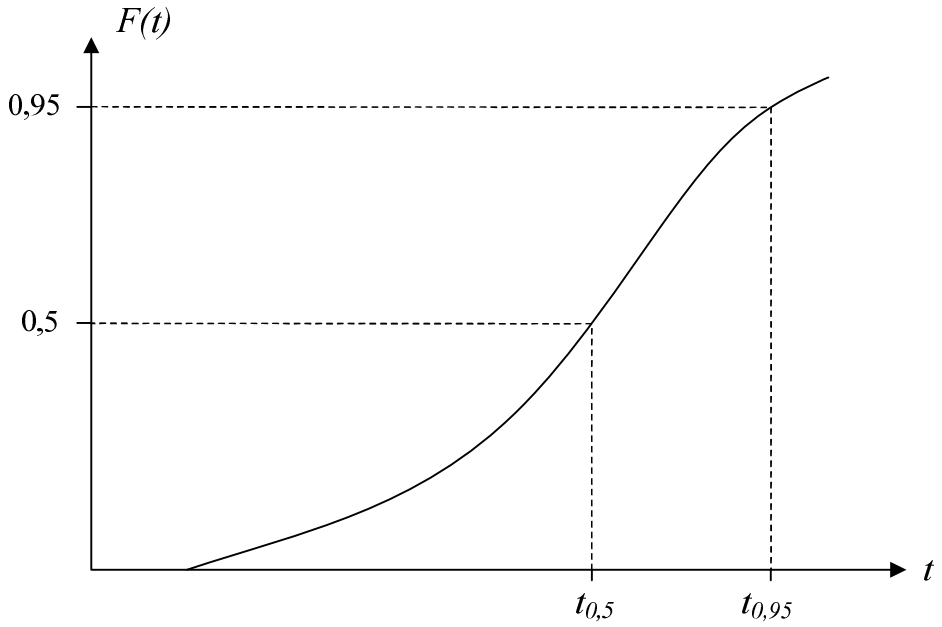


Рисунок П1.5. Квантили функции распределения

Графически квантиль определяется очень просто. Аналитически значения квантиля t_p для значения ФР, равного p, можно получить, решив уравнение:

$$F(t_p) = p. \qquad \text{(П1.21)}$$

Иногда функция распределения определяется в процентах – от 0 до 100%. В этом случае вместо слова "квантиль" иногда используется термин "процентиль".

Рассмотрим распределения, которые интересны с точки зрения теории телетрафика. Начнем с законов распределения дискретных случайных величин.

В теории телетрафика часто используется предположение о пуассоновском законе распределения случайных величин. Такое предположение, например, было подтверждено экспериментально для потока вызовов, поступающих от абонентов телефонных станций большой емкости. Для математического ожидания λ плотность вероятности – $p(x)$ определяется так:

$$p(x) = \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda}. \qquad (П1.22)$$

Переменную "x" целесообразно рассматривать как количество заявок (например, вызовов, которые осуществляются абонентами телефонной станции), поступающих в течение интервала времени фиксированной длины. Основные свойства пуассоновского потока заявок рассматриваются во втором Приложении. Функция распределения этого потока – $F(x)$ равна нулю для $x \le 0$. Для $x > 0$ она определяется соотношением такого вида:

$$F(x) = e^{-\lambda} \sum_{i=0}^{k} \frac{\lambda^i}{i!}, \quad k < x \le k+1, \quad k = 0, 1, 2, ... \qquad (П1.23)$$

Основные характеристики пуассоновского распределения представлены в таблице П1.1.

Таблица П1.1. Характеристики пуассоновского распределения

Математическое ожидание	Дисперсия	Асимметрия	Эксцесс
λ	λ	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}}$	$\frac{1}{\lambda}$

На рисунке П1.6 показаны два примера функции $f(x)$. В левой части рисунка $\lambda = 1$, а в правой – $\lambda = 3$. При возрастании величины λ огибающая гистограммы начинает напоминать один из хорошо известных законов распределения случайных величин. Речь идет о распределении Гаусса-Лапласа [4]. Специалисты, занимающиеся прикладными исследованиями, обычно называют его нормальным распределением.

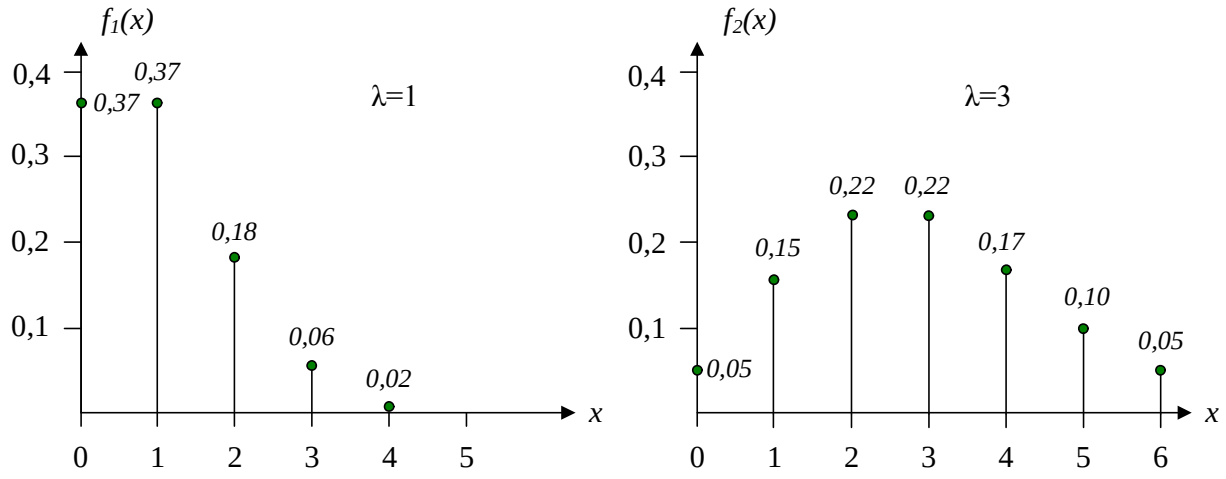


Рисунок П1.6. Два примера распределения Пуассона

Второй интересный пример – дискретное равномерное распределение. Оно показано на рисунке П1.7. Буквой "b" обозначена левая граница области изменения случайной величины. Рассматриваемая случайная величина принимает n значений.

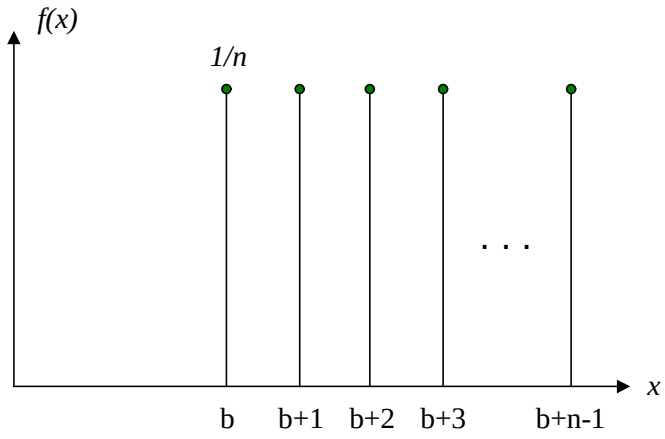


Рисунок П1.7. Дискретное равномерное распределение

Основные характеристики дискретного равномерного распределения представлены в таблице П1.2.

Таблица П1.2. Характеристики дискретного равномерного распределения

Математическое ожидание	Дисперсия	Асимметрия	Эксцесс
$b+\frac{n-1}{2}$	$\frac{n^2-1}{12}$	0	$-1,2-\frac{2,4}{n^2-1}$

Для обоих примеров ФР будет ступенчатой. Это утверждение справедливо для всех законов распределения дискретных случайных величин. Свойства ступенчатых функций будут рассмотрены ниже.

Оставшаяся часть этого раздела посвящена примерам законов распределения для непрерывных случайных величин. Обычно в качестве случайной величины, для которой характерно непрерывное распределение, фигурирует время t. Данное утверждение можно рассматривать как естественное с точки зрения наблюдений за процессами обслуживания трафика в телекоммуникационных сетях. Правда, в некоторых случаях целесообразно рассматривать модели, состояние которых может меняться через определенные кванты времени. Тогда вводится термин "дискретное время". В этой монографии, как правило, рассматриваются СМО, в которых время обслуживания непрерывно. Данный подход зачастую можно использовать и в тех случаях, когда изменения функций $f(t)$ и $F(t)$ происходят только в заранее заданных точках на оси "Время".

В теории телетрафика очень часто используется экспоненциальное распределение, для которого функции $f(t)$ и $F(t)$ определяются такими формулами:

$$f(t)=\lambda e^{-\lambda t}, \qquad F(t)=1-e^{-\lambda t}. \tag{П1.24}$$

Основные характеристики экспоненциального распределения будут приведены после следующего примера – распределения Эрланга $k-го$ порядка. Функции $f(t)$ и $F(t)$ для этого распределения вычисляются следующим образом:

$$f(t)=\frac{\lambda^k}{(k-1)!}t^{k-1}e^{-\lambda t}, \qquad F(t)=1-e^{-\lambda t}\sum_{i=0}^{k-1}\frac{(\lambda t)^i}{i!}. \tag{П1.25}$$

При $k=1$ мы получаем экспоненциальное распределение. Можно показать, что при $k\to\infty$ формула (П1.25) определяет детерминированное (вырожденное) распределение. Это свойство позволяет эффективно использовать распределение Эрланга $k-го$ порядка для многих моделей телетрафика. Характеристики двух исследуемых распределений приведены в таблице П1.3. Подставив $k=1$, можно удостовериться, что все параметры обоих распределений совпадают.

Таблица П1.3. Характеристики экспоненциального и эрланговского распределений

Название распределения	Математическое ожидание	Дисперсия	Асимметрия	Эксцесс
Экспоненциальное	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{1}{\lambda^2}$	2	6
Эрланга $k-го$ порядка	$\frac{k}{\lambda}$	$\frac{k}{\lambda^2}$	$\frac{2}{\sqrt{k}}$	$\frac{6}{k}$

На рисунке П1.8 показано семейство распределения Эрланга $k-го$ порядка. Приведены три кривые $f(t)$ для различных значений k. Для всех трех кривых принято, что математическое ожидание случайной величины равно единице.

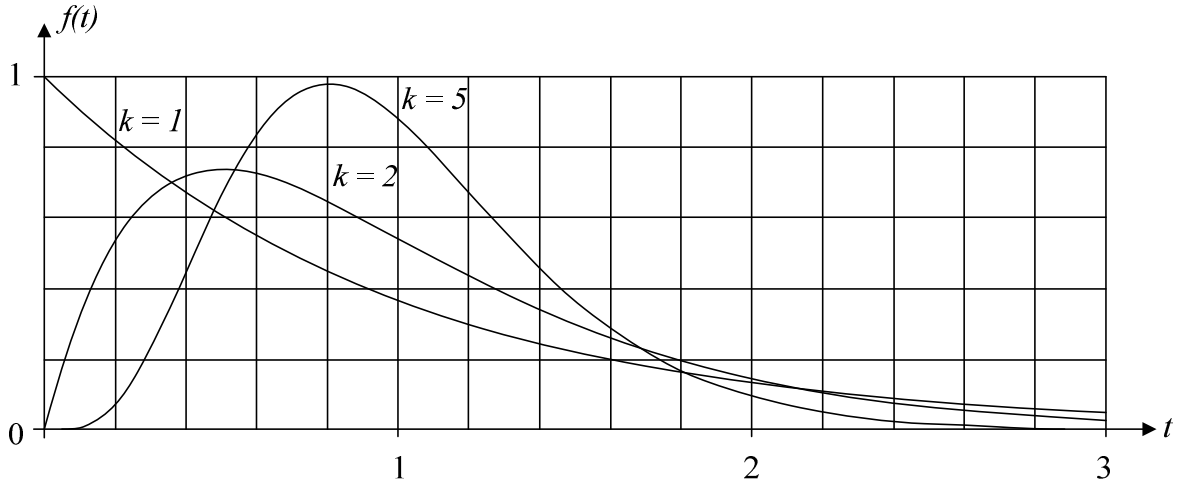


Рисунок П1.8. Семейство распределений Эрланга $k-го$ порядка

Последний пример связан с равномерным распределением случайной величины на ограниченном интервале времени $[a, b]$. Функции $f(t)$ и $F(t)$ определяются так:

$$f(t) = \frac{1}{b-a}, \quad F(t) = \frac{t-a}{b-a}. \qquad (П1.26)$$

На рисунке П1.9 показаны функции $f(t)$ и $F(t)$. Основные характеристики этого распределения представлены в таблице П1.4.

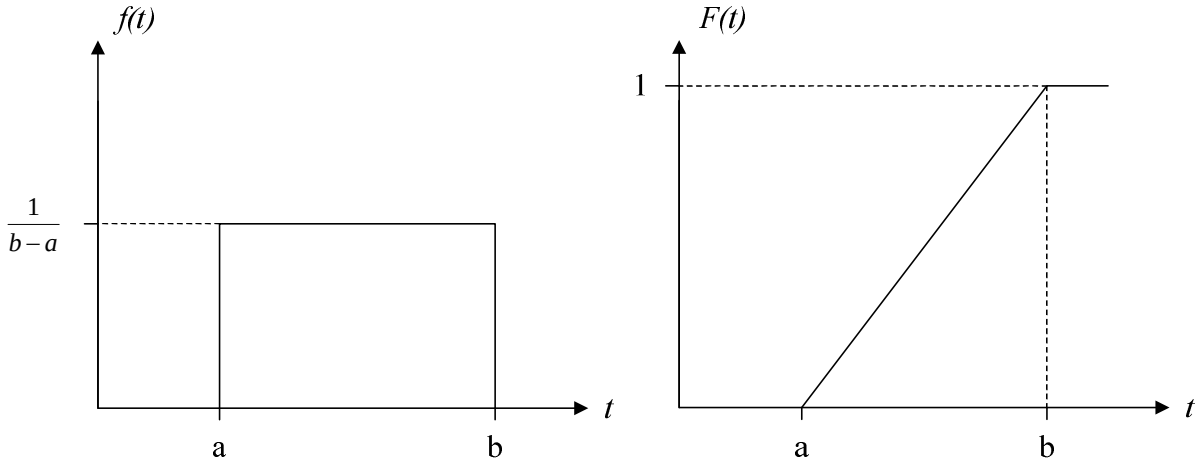


Рисунок П1.9. Равномерное распределение на интервале $[a,b]$

Таблица П1.4. Характеристики равномерного распределения

Математическое ожидание	Дисперсия	Асимметрия	Эксцесс
$\frac{a+b}{2}$	$\frac{(b-a)^2}{12}$	0	–1,2

Примеры других распределений хорошо представлены в [4, 5, 6]. Более того, в этих книгах содержится подробный перечень параметров для каждого рассматриваемого распределения. Данный раздел не следует рассматривать как краткое пособие по теории вероятностей. Поставленная задача была существенно скромнее: напомнить читателям некоторые фрагменты теории вероятностей для более простого восприятия ряда разделов монографии и материалов второго Приложения.

Усложнять – просто, упрощать – сложно.
(Законы Мерфи. Закон Мейера)

П1.2. Преобразование Лапласа-Стилтьеса

Преобразование Лапласа устанавливает однозначную связь между функциями действительной – $F(t)$ и комплексной – $\varphi(s)$ переменных. Эти функции называются оригиналом и изображением соответственно. Для оригиналов, существующих только в области неотрицательных значений аргумента (времени), целесообразно использовать одностороннее преобразование Лапласа [8, 9, 10]:

$$\varphi(s) = \int_0^\infty F(t)e^{-st}dt. \qquad (П1.27)$$

Функция $\varphi(s)$ комплексной переменной $s = \sigma + i\omega$ позволяет найти оригинал по такой формуле:

$$F(t) = \frac{1}{2\pi i}\int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} \varphi(s)e^{st}ds. \qquad (П1.28)$$

Это соотношение известно в математике как формула обращения Римана-Моллина [10]. Его также называют обратным преобразованием Лапласа.

В формулах (П1.27) и (П1.28) используются интегралы Римана [9, 10]. Во многих случаях приходится оперировать с дискретными функциями плотности вероятности. Тогда предпочтительнее становится интеграл Стилтьеса [9], позволяющий унифицировать тип распределения случайной величины. Интеграл Стилтьеса определяется для двух функций: интегрируемой – ϕ (x) и интегрирующей – $\phi(x)$:

$$\int \varphi(x)d\phi(x). \qquad (П1.29)$$

Интеграл Римана представляет собой частный случай интеграла Стилтьеса, когда $\phi(x) = x$. Преобразование Лапласа-Стилтьеса для функции $F(t)$ – $\psi(s)$ определяется следующим образом:

$$\psi(s) = \int_0^\infty e^{-st}dF(t). \qquad (П1.30)$$

Если изображения (П1.27) и (П1.30) существуют, то они связаны между собой очевидным соотношением:

$$\psi(s) = s\varphi(s). \qquad (П1.31)$$

Интерес к преобразованию Лапласа-Стилтьеса объясняется тем, что оно позволяет упростить исследование некоторых функций и вычисление параметров распределения. С точки зрения вопросов, рассматриваемых в монографии, следует выделить ряд свойств, которые характерны для преобразования Лапласа-Стилтьеса:

1. Преобразование Лапласа-Стилтьеса производной от функции $F(t)$ определяется по такой формуле:

$$\frac{dF(t)}{dt} \to s\psi(s) - s\psi(+0). \qquad (П1.32)$$

2. Дифференцированием изображения можно получить $r-й$ начальный момент распределения – $t^{(r)}$:

$$t^{(r)} = (-1)^r \frac{d^r\psi(s)}{ds^r}\Big|_{s=0}. \qquad (П1.33)$$

3. ФР двух независимых случайных величин определятся через произведение их преобразований Лапласа-Стилтьеса – $\psi_1(s)$ и $\psi_2(s)$:

$$\psi(s) = \psi_1(s)\psi_2(s). \qquad (П1.34)$$

4. Сдвиг аргумента у оригинала на величину τ – первая теорема смещения [11] – соответствует такому изменению изображения:

$$F(t-\tau) \to e^{-\tau s}\psi(s). \qquad (П1.35)$$

Из всех свойств, присущих преобразованию Лапласа-Стилтьеса, следует выделить свертку оригиналов. Вычисление свертки функций при помощи преобразований можно рассматривать как одну из самых эффективных операций среди прочих возможностей.

Использование преобразования Лапласа-Стилтьеса в большинстве случаев можно представить в виде алгоритма, показанного на рисунке П1.10. Этот алгоритм универсален с точки зрения решаемых задач.

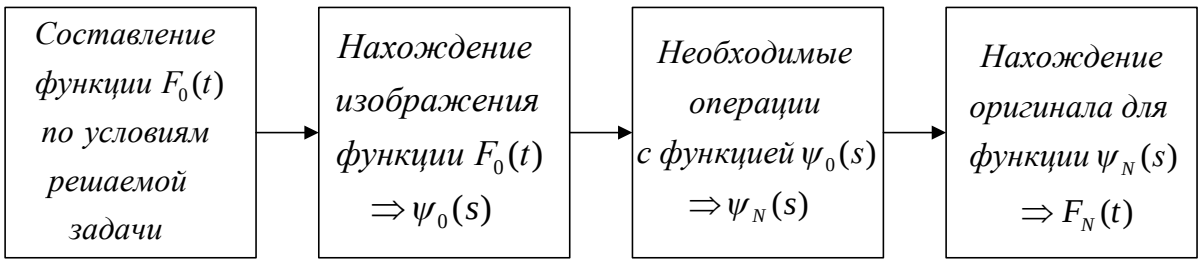


Рисунок П1.10. Использование преобразования Лапласа-Стилтьеса

Функция $F_0(t)$ представляет собой выражение, которое необходимо преобразовать для искомого результата. Выбор этой функции можно рассматривать как постановку задачи. Далее находится изображение этой функции – $\psi_0(s)$. Изображение может быть получено с помощью таблиц преобразования Лапласа [10, 11]. Именно для функции $\psi_0(s)$ выполняются преобразования, позволяющие получить ответ в виде функции $\psi_N(s)$. Для решения поставленной задачи необходимо найти функцию $F_N(t)$. Эта процедура может быть выполнена с использованием таблиц или иным способом.

Для вычисления оригинала по известному изображению часто применяют теорему разложения, предложенную Хевисайдом. Такой способ приемлем, если изображение $\psi(s)$ является рациональной дробью следующего вида:

$$\psi(s) = \frac{\psi_1(s)}{\psi_2(s)}. \qquad (П1.36)$$

Числителем и знаменателем выражения (П1.36) служат два полинома. Существенно то, что степень полинома числителя должна быть меньше степени полинома знаменателя. Если уравнение $\psi(s) = 0$ имеет n различных корней, то искомая функция представима такой суммой [10, 11]:

$$\psi(s) = \sum_{k=1}^{n} \frac{\psi(s)_1(s_k)}{\psi(s)_2'(s_k)} \cdot \frac{1}{s - s_k}. \qquad (П1.37)$$

Используя таблицы обратного преобразования Лапласа, можно найти оригинал в следующем виде:

$$F(t) = \sum_{k=1}^{n} \frac{\psi_1(s_k)}{\psi_2'(s_k)} \cdot e^{s_k t}. \qquad (П.1.38)$$

Такое преобразование справедливо в том случае, если полином $\psi_2(s)$ не имеет нулевых и кратных корней. В противном случае оригинал получить сложнее. Примеры нахождения оригинала для нулевых и кратных корней полинома $\psi_2(s)$ приведены в шестом Приложении.

Начальство склонно давать работу тем,
кто менее всего способен ее выполнить.
(Законы Мерфи. Закон Корнуэлла)

П1.3. Применение ступенчатых функций распределения

Законы распределений, используемые в теории телетрафика, обычно определяются на основании результатов измерений исследуемой случайной величины. Эта случайная величина может быть дискретной или непрерывной. Чаще всего ступенчатые функции используются для описания времени обслуживания заявок. В современной литературе по теории телетрафика ФР длительности обслуживания заявок обычно обозначается как $B(t)$, а ее изображение – как $\beta(s)$.

Для дискретной случайной величины результаты измерений – с определенной погрешностью – позволяют получить истинную ФР, преобразование Лапласа-Стилтьеса которой представимо в таком виде:

$$\beta(s) = \sum_{\{J\}} P_j e^{-t_j s}. \qquad (П1.39)$$

Величина P_j определяет приращение ФР в точке t_j. Для дискретных случайных величин, как упоминалось выше, правило определения ФР становится существенным. Если использовать формулу (П1.5), то в точке t_j значение ФР не включает приращение P_j. Это приращение прибавляется к значению ФР в точке t_j только при выборе формулы (П1.7). Иными словами значения ступенчатой ФР различны для точек t_{j-0} и t_{j+0}.

Если обозначить через τ наибольший общий делитель для всех значений t_j из множества $\{J\}$, то формулу (П1.39) можно переписать так:

$$\beta(s) = \sum_{i=0}^{Z} P_i \, e^{-i\tau s}. \qquad (П1.40)$$

При этом некоторые значения P_j будут равны нулю. Величина Z определяет последнее приращение функции $B(t)$. В ряде случаев букву Z приходится заменять символом "∞". Из соотношения (П1.40) элементарно определяются моменты случайной величины порядка r – $B^{(r)}$:

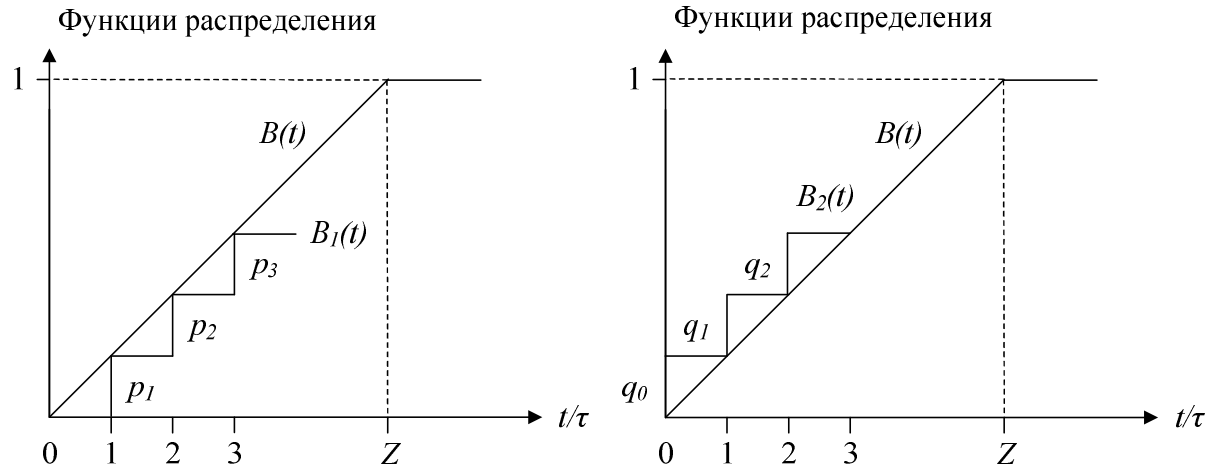
$$B^{(r)} = \tau^r \sum_{i=0}^{Z} i^r P_i. \qquad (П1.41)$$

Для непрерывной случайной величины, измеряемой с периодом τ, формулу (П1.40) можно рассматривать как приближенную. Погрешность измерений будет дополняться ошибкой, подобной "шуму квантования", который возникает при аналого-цифровом преобразовании сигналов [12] в системах с импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). После завершения измерений часто используют методы обработки статистических данных с целью выбора подходящего из известных законов распределения непрерывной случайной величины. Таким образом, истинная ФР непрерывной случайной величины искажается дважды. Это происходит за счет последовательных преобразований "аналог – цифра – аналог".

Следует также отметить, что большинство законов распределения, используемых в моделях телетрафика, определяют функцию $B(t)$ на отрезке $[0,\infty)$. На практике функция $B(t)$ ограничена неким значением $T_{MAX} < \infty$. Наличие "хвостов" в подбираемой ФР может привести к значительным ошибкам в ряде практически важных задач.

Если отказаться от процедуры поиска известного закона распределения непрерывной случайной величины, то можно не только избежать дополнительных ошибок при анализе моделей телетрафика, но и упростить решение ряда задач. Более того, если весьма точно известна ФР для непрерывной случайной величины, то можно найти такие две функции, которые позволят получить верхние и нижние границы всех характеристик исследуемой системы.

Это утверждение объясняет рисунок П1.11, на котором показаны два графика. В качестве функции $B(t)$ выбрана ФР для закона равномерной плотности на отрезке $(0, Z)$. Этот выбор не накладывает каких-либо ограничений на предлагаемый метод анализа характеристик функции $B(t)$.



а) Первая аппроксимация функции B(t) б) Вторая аппроксимация функции B(t)

Рисунок П1.11. Преобразование ФР непрерывной случайной величины

Преобразования Лапласа-Стилтьеса для функций $B_1(t)$ и $B_2(t)$ можно представить в следующей редакции:

$$\beta_1(s) = \sum_{i=0}^{Z} p_i e^{-i\tau s}, \ \beta_2(s) = \sum_{i=0}^{Z} q_i e^{-i\tau s}. \qquad (П1.42)$$

Очевидно, что $p_1 = 0$. Остальные приращения одинаковы и определяются таким соотношением:

$$p_i = q_i = \frac{1}{Z}. \qquad (П1.43)$$

Функции $B_1(t)$ и $B_2(t)$ позволяют получить верхние и нижние оценки основных характеристик распределения $B(t)$. Практический интерес представляет также функция $B_3(t)$, показанная на рисунке П1.12. С ее помощью можно получить оценки, наиболее близкие к характеристикам функции $B(t)$.

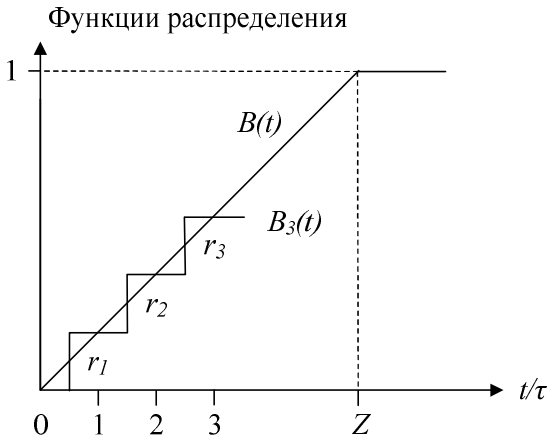


Рисунок П1.12. Вид функции $B_3(t)$

В шестом Приложении будет показано, что использование ступенчатых функций во многих случаях позволяет не только упростить вычисление моментов случайных величин, что, в свою очередь, облегчает анализ систем телетрафика. Использование обычных средств вычислительной техники и простых программных продуктов дает возможность рассчитывать моменты случайной величины для весьма больших значений Z. Поэтому применение ступенчатых функций становится эффективным методом для исследования характеристик систем телетрафика.

Ряд полезных результатов для СМО с произвольным характером входящего потока заявок с интенсивностью λ и постоянным временем обслуживания получен в [13]. В частности, показано, что среднее значение времени задержки заявок и дисперсия этой случайной величины могут быть вычислены с заданной величиной относительной ошибки – δ. Для этого необходимо брать отсчеты ФР длительности интервалов между моментами поступления соседних заявок с периодом τ, определяемым следующим неравенством:

$$\tau \le \frac{2\delta}{\lambda}. \qquad (П1.44)$$

Для распределений с коэффициентом вариации более единицы выбор номинала τ в соответствии с соотношением (П1.44) обеспечивает более точную оценку характеристик СМО. Это весьма важно для ряда моделей, формализующих процессы функционирования современных телекоммуникационных сетей.

Литература к Приложению 1

1. А.Н. Колмогоров. Основные понятия теории вероятностей. – М.: Наука, 1974.

2. Б.В. Гнеденко. Курс теории вероятностей. – М.: издательство "Эдиториал УРСС", 2001.
3. Е.С. Вентцель. Теория вероятностей. – М.: издательский центр "Академия", 2005.
4. Р.Н. Вадзинский. Справочник по вероятностным распределениям. – СПб.: Наука, 2001.
5. Е.И. Куликов. Прикладной статистический анализ. – М.: Радио и связь, 2003.
6. З.Брандт. Анализ данных. Статистические и вычислительные методы для научных работников и инженеров. – М.: Мир, 2003.
7. Ю.В. Прохоров, Ю.А. Розанов. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1987.
8. В.А. Диткин., А.П. Прудников. Операционное исчисление. – М.: Высшая школа, 1966.
9. В.М. Вишневский. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003.
10. Т. Корн, Г. Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984.
11. Г. Деч. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. – М.: Наука, 1971.
12. Дж. Беллами. Цифровая телефония. Перевод с английского. – М.: Радио и связь, 1986.
13. А.Н. Соколов. Приближенный метод анализа однолинейных систем телетрафика с постоянным временем обслуживания заявок. – Проблемы информатики, 2010, №3.

Если неправильно набрать номер,
никогда не будет гудка "Занято".
(Законы Мерфи. Загадка Ковака)

Приложение 2. Некоторые разделы теории телетрафика

Истина – в науке. Не позволяйте
фактам вводить вас в заблуждение.
(Законы Мерфи. Кредо Фингэйла)

П2.1. Модель системы массового обслуживания

Рассмотрим модель, показанную на рисунке П2.1. Ее обычно называют "*черным ящиком*". Понятие "черный ящик" (black box) было введено для упрощения исследования сложных систем. Представление сложной системы в виде "черного ящика" не требует знания принципов ее работы. Как правило, достаточно изучить процессы на входе и на выходе системы. Далее такой "черный ящик" будет именоваться системой массового обслуживания (СМО). В качестве синонима термина "СМО" в технической литературе по электросвязи встречается также словосочетание "система телетрафика". Далее, наряду с аббревиатурой СМО, используется слово "система".

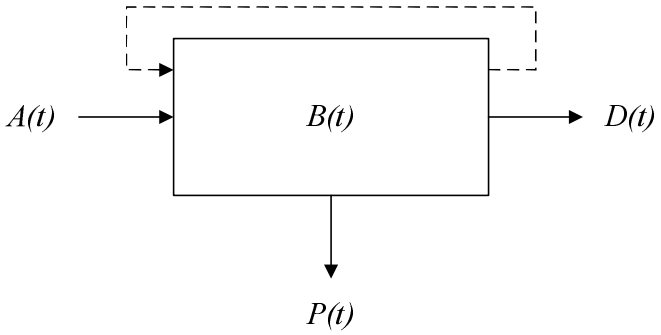


Рисунок П2.1. Модель системы массового обслуживания

Процесс $A(t)$ на входе СМО связан с одним из самых важных понятий в теории телетрафика – потоком заявок. Вместо слова "заявка" используются (существенно реже) термины "требование" или "событие". Под заявкой понимается то, что должно быть обслужено. Например, вызов в сети телефонной связи для установления соединения, или IP-пакет для передачи между терминалами.

Слово "*обслужено*" следует рассматривать как универсальное обозначение неких операций, которые могут заключаться в установлении соединения в телефонной сети, обработке информации или же в ином действии. В любом случае предполагается, что обслуживание может быть описано процессом $B(t)$.

В некоторых случаях заявка не может быть обслужена. Тогда она покидает СМО. Процесс $P(t)$ отображает события такого рода. Кроме того, процесс $P(t)$ может быть использован для учета влияния дисциплин обслуживания заявок в системе.

Успешно обслуженные заявки формируют поток, представимый процессом $D(t)$. Этот поток принято называть *выходящим*.

Пунктирной линией показана "петля обратной связи". В некоторых СМО часть обслуженных заявок по каким-либо причинам может снова поступить на вход системы. Такие модели в монографии не рассматриваются.

Сложность анализа систем телетрафика, в значительной мере, зависит от вида функций $A(t)$ и $B(t)$, а также от количества обслуживающих приборов и алгоритма обработки заявок. Кроме того, сложность анализа СМО определяется принятым способом нормирования показателей качества обслуживания.

Измеряй микрометром. Отмечай мелом. Отрубай топором.
(Законы Мерфи. Правило точности Рэя)

П2.2. Потоки заявок

Поток заявок целесообразно рассматривать как последовательность, определяемую на оси "Время". На этой оси можно выделить моменты времени x_i, в которые заявки поступают на вход СМО. Значения x_i соответствуют, например, тем моментам времени, когда абоненты телефонной станции снимают трубку телефонного аппарата, намереваясь позвонить. Очевидно, что значения x_i следует рассматривать как случайные величины. Поток заявок также будет случайным. Существуют и детерминированные потоки заявок. Для них значения x_i заданы неким расписанием; следовательно, анализ потока заявок не связан с изучением случайных величин.

В этом Приложении рассматриваются случайные потоки заявок. Тем не менее, в качестве первого примера целесообразно привести процесс поступления заявок в том случае, когда поток можно считать детерминированным. На рисунке П2.2 показаны пять моментов времени x_i $(i = \overline{0, 4})$, в которые на вход СМО поступают заявки.

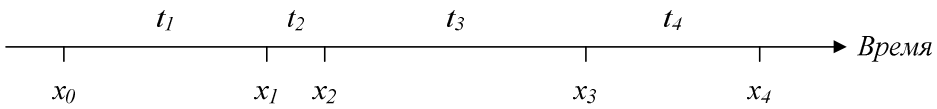


Рисунок П2.2. Первая модель потока заявок

Длительность $i-го$ промежутка времени между моментами поступления соседних заявок составляет t_i. Очевидно, что $t_i = x_i - x_{i-1}$ для всех $i \geq 1$. Модель, изображенная на рисунке П2.2, содержит всю необходимую информацию о входящем потоке заявок лишь при одном условии. Оно заключается в том, что в любой момент времени x_i может поступить только одна заявка. В противном случае необходимо задать величины k_i $(i = \overline{0, 4})$, которые определяют количество заявок, поступающих в момент времени x_i. Для рассматриваемой модели $k_i \equiv 1$. Предположим, что в моменты времени x_1 и x_4 на вход СМО поступают две заявки сразу. Тогда лучше использовать другую модель потока заявок. Она показана на рисунке П2.3. В ней добавлена ось "Количество заявок", которая позволяет указать все возможные значения k_i.

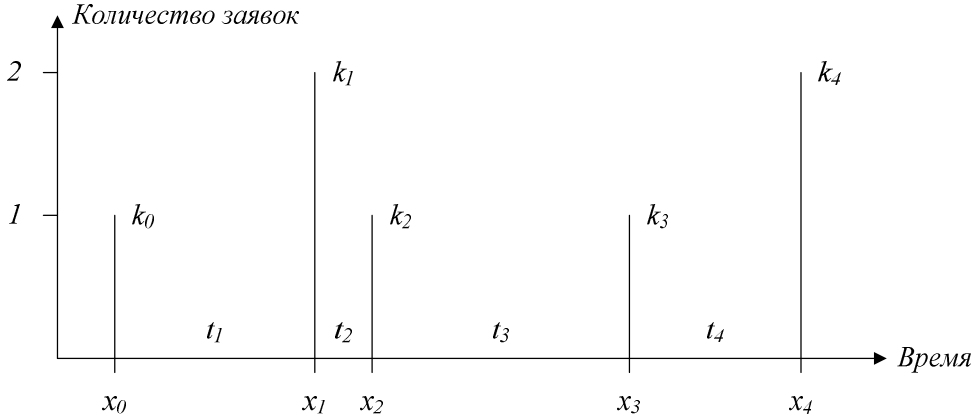


Рисунок П2.3. Вторая модель потока заявок

Модели, приведенные на рисунках П2.2 и П2.3, позволяют описать так называемые *однородные* потоки заявок. Слово "однородный" в данном случае используется для того, чтобы подчеркнуть факт общности заявок с точки зрения теории телетрафика. Это значит,

что моменты x_i или величины t_i позволяют уяснить характер потока заявок. Подобная трактовка определения "однородный" напрямую не связана с природой заявок. В этом Приложении рассматриваются СМО, на вход которых поступают однородные потоки заявок. Более того, исследуются модели телетрафика с *финитными потоками* заявок. Для финитных потоков всегда существует математическое ожидание количества заявок для конечного интервала времени.

Математическое ожидание (среднее значение) количества заявок, поступающих на интервале времени $[0, t)$, принято называть ведущей функцией потока – $\Lambda(0,t)$. Данная функция, по определению, не может быть отрицательной и убывающей. Потоки заявок с монотонно возрастающей функцией $\Lambda(0,t)$ именуются *регулярными*. Для ряда моделей телетрафика кривую $\Lambda(0,t)$ целесообразно представлять в виде ступенчатой функции. Такие потоки заявок называют *сингулярными*.

Вернемся к модели, изображенной на рисунке П2.1. Очевидно, что процесс $A(t)$ на входе СМО целесообразно рассматривать как ФР случайной величины. Далее, как и в первом Приложении, для обозначения случайных величин используются прописные буквы латинского алфавита. Возможным значениям случайных величин соответствуют строчные буквы. Тогда процесс $A(t)$ представляет собой ФР, определяемую следующим образом:

$$F(t) = P(T < t). \qquad \text{(П2.1)}$$

Большинство моделей телетрафика основано на том, что отрезки времени t_i можно считать независимыми, одинаково распределенными случайными величинами. Тогда ФР (П2.1) содержит полную информацию о потоке заявок, поступающих на вход СМО. Если значения t_i нельзя считать независимыми и одинаково распределенными случайными величинами, то задается совместный закон распределения n случайных величин:

$$P\left(T_i < t_i, i = \overline{1, n}\right) = P\left(T_1 < t_1, T_2 < t_2, ..., T_n < t_n\right). \qquad \text{(П2.2)}$$

В этом Приложении рассматриваются модели телетрафика, для которых входящий поток заявок представим ФР вида (П2.1). Более того, для большинства анализируемых СМО предполагается, что входящим потокам заявок присущи три важных свойства:

- *стационарность;*
- *ординарность;*
- *отсутствие последействия.*

Для стационарного потока вероятность поступления k заявок за некий промежуток времени от точки a до точки b зависит только от величины $(b-a)$. Эта вероятность инвариантна к значениям a и b на оси "Время".

Важная характеристика потока заявок – вероятность поступления хотя бы k вызовов на отрезке времени (a, b) – $\varphi_k(a,b)$. Эта вероятность позволяет сформулировать условие ординарности потока заявок. Пусть $\tau = b - a$. Тогда поток заявок будет ординарным, если при $\tau \to 0$ справедливо такое условие:

$$\lim_{\tau \to 0} \frac{\phi_2\left(a, a+\tau\right)}{\tau} = 0. \qquad \text{(П2.3)}$$

С практической точки зрения свойство ординарности означает, что в любой момент времени на вход СМО не могут поступить две (или более) заявки. Для большинства потоков заявок, исследуемых в теории телетрафика, гипотеза об ординарности допустима. Правда, ряд СМО не может быть представлен моделями с потоками заявок, для которых свойственна ординарность. Пачка телеграмм, принесенная в почтовое отделение, служит типичным примером модели с неординарным потоком заявок.

Допустим, что мы рассматриваем поток заявок после какого-то момента времени t_0. Если его характеристики не зависят от поведения потока для $t < t_0$, то можно говорить об отсутствии последействия.

В этом Приложении рассматриваются стационарные ординарные потоки заявок без последействия. Для них вводится одна характеристика потока заявок – интенсивность. Она будет обозначаться греческой буквой λ, как принято в большинстве последних публикаций по теории телетрафика. Для потоков, которые не отвечают перечисленным выше свойствам, необходимо ввести параметр потока – $\kappa(t)$. Он определяется как предел отношения вероятности поступления хотя бы одной заявки за период $[t, t+\tau)$ к длине этого отрезка времени при $\tau \to 0$.

Вернемся к рисунку П2.2. Статистическая информация о величинах t_i позволяет определить ФР, обозначенную как $A(t)$. Предположим, что для этой функции существует преобразование Лапласа-Стилтьеса – $\alpha(s)$. Тогда математическое ожидание длительности интервала между моментами поступления соседних заявок – $A^{(1)}$ определяется по одной из двух следующих формул:

$$A^{(1)} = \int_0^\infty t dA(t), \quad A^{(1)} = -\frac{d\alpha(s)}{ds}\Big|_{s=0}. \qquad (П2.4)$$

Величины λ и $A^{(1)}$ связаны между собой простым соотношением:

$$\lambda = \frac{1}{A^{(1)}}. \qquad (П2.5)$$

В теории телетрафика часто используется предположение, что входящий поток заявок может быть представлен при помощи пуассоновского закона распределения. Этот закон определяет вероятность поступления ровно k заявок – p_k за промежуток времени длительностью t:

$$p_k = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}. \qquad (П2.6)$$

Гистограммы, иллюстрирующие изменение значений p_k для разных величин λ, были приведены на рисунке П1.6. Для пуассоновского потока заявок распределение $A(t)$ подчиняется экспоненциальному закону:

$$A(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \qquad (П2.7)$$

Для экспоненциального закона распределения известны величины дисперсии – σ^2, коэффициента вариации – v и $p-$квантиля – t_p:

$$\sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2}, \quad v = 1, \quad t_p = -\frac{1}{\lambda} ln(1-p). \qquad (П2.8)$$

Три перечисленные характеристики случайных величин будут часто встречаться в монографии. Это объясняется принципами нормирования базовых показателей качества обслуживания, которые приняты международным сообществом. Для некоторых законов распределения величину t_p можно получить только численно за счет решения уравнения (П1.21). Выражения для вычисления дисперсии и коэффициента вариации приводятся в справочной литературе по теории вероятностей.

Далее, помимо пуассоновского, подробно рассматриваются еще два вида входящего потока заявок. Во-первых, анализируется СМО, на вход которой может поступать поток

заявок с произвольным распределением $A(t)$. Правда, подробный анализ возможен только для узкого класса моделей. Во-вторых, исследуется СМО, для которой входящий поток заявок может быть задан некой гистограммой, что позволяет представить распределение $A(t)$ ступенчатой функцией – рисунок П2.4. Предполагается, что момент времени, когда не исключено поступление заявки, можно представить в виде произведения $i\tau$ $\left(i=\overline{0,N}\right)$.

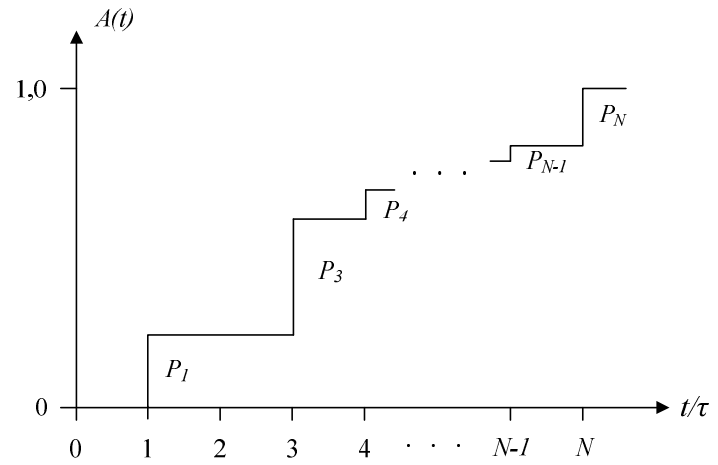


Рисунок П2.4. Пример ступенчатой функции

Ступенчатую функцию $A(t)$ проще представить при помощи ее преобразования Лапласа-Стилтьеса:

$$\alpha(s)=\sum_{i=0}^{N}P_i e^{-i\tau s}. \qquad (П2.9)$$

В некоторых точках по оси "Время" функция $A(t)$ не имеет приращений. Например, для распределения $A(t)$, показанного на рисунке П2.4, $P_0=0$ и $P_2=0$. Информация о количестве заявок, поступающих в СМО, обычно формируется в результате измерений. На рисунке П2.5 показано изменение количества вызовов (в данном примере они играют роль заявок), обслуживаемых телефонной станцией, за одни сутки.

Источник: ITU-D. Teletraffic Engineering Handbook (edited by V.B. Iversen). – Geneva, 2003.

Рисунок П2.5. Изменение количества вызовов за сутки

Гистограмма, показанная на рисунке П2.5, была получена в результате обработки статистических данных, которые собирались в течение десяти дней. Эти десять дней соответствовали двум рабочим неделям. Конечно, такая выборка не позволяет судить об изменении количества поступающих вызовов в течение квартала или года. Более того, в некоторых случаях полезно выделить тренды, описывающие изменения исследуемого процесса в течение нескольких лет. Тем не менее, данные, подобные тем, что приведены на рисунке П2.5, представляют большой практический интерес.

Характер изменения количества вызовов в течение суток говорит о том, что данный поток не обладает свойством стационарности. Для многих практических задач, решаемых методами теории телетрафика, важен *час наибольшей нагрузки* (ЧНН). Для этого периода времени предположение о стационарности потока заявок считается приемлемым.

Для более подробного ознакомления с потоками заявок и их характеристиками целесообразно использовать монографии [1 – 5]. Будут также полезны и книги, в которых изложены важные положения по теории вероятностей [6, 7]. Некоторые сведения можно найти и в справочниках по математике [8, 9].

Телефон зазвонит, когда вы находитесь перед входом
в квартиру и безуспешно пытаетесь открыть ее.
(Законы Мерфи. Всеобщие принципы Бесса)

П2.3. Длительность обслуживания заявок

Длительность обслуживания иногда может считаться постоянной величиной. Чаще ее следует рассматривать как случайную величину. По этой причине процесс $B(t)$ следует интерпретировать как ФР длительности обслуживания заявок. В этом Приложении будут рассматриваться такие функции $B(t)$, для которых существует преобразование Лапласа-Стилтьеса – $\beta(s)$.

Рассмотрим статистические данные о средней длительности телефонного разговора. На рисунке П2.6 приведены соответствующие значения за сутки.

Источник: ITU-D. Teletraffic Engineering Handbook (edited by V.B. Iversen). – Geneva, 2003.

Рисунок П2.6. Изменение средней длительности телефонного разговора в сутки

Статистические данные, использованные для построения этой гистограммы, были собраны в 1973 году. Поэтому измеряемая величина связана с трафиком речи. Передача факсимильных сообщений в это время была большой редкостью, а трафик данных вообще отсутствовал.

Следует отметить, что длительность местных соединений при сборе статистических данных не учитывалась. Это означает, что рассматривался только междугородный и международный трафик речи. Необходимо также подчеркнуть, что измеряемая величина характерна для соединений, устанавливаемых со стационарных телефонных терминалов (в 1973 году мобильной связи еще не было). Для сетей мобильной связи характерны иные распределения численности вызовов и средней длительности разговоров.

Таким образом, рассматриваемый пример связан с заявками, роль которых играют вызовы, обслуживаемые стационарной телефонной сетью. Для других сетей электросвязи закономерности, подобные тем, которые могут быть установлены в процессе анализа приведенной выше гистограммы, нельзя считать корректными.

График, показанный на рисунке П2.6, иллюстрирует изменение среднего значения (математического ожидания) длительности обслуживания заявок. Очевидно, что процесс, наблюдаемый в течение суток, не может быть представлен функцией $B(t)$, для которой среднее значение длительности обслуживания заявок является постоянной величиной. Тем не менее, в теории телетрафика обычно используются функции $B(t)$, для которых среднее значение – $B^{(1)}$ не меняется. Эта гипотеза обусловлена актуальностью анализа поведения исследуемой системы в течение ЧНН.

Среди тех распределений $B(t)$, которые представляют практический интерес, можно выделить семь законов. Ниже приводятся соответствующие распределения и средние значения длительности обслуживания заявок.

Во многих исследованиях, касающихся телефонного трафика, используется гипотеза об экспоненциальном распределении длительности обслуживания заявок:

$$B_1(t) = 1 - e^{-\mu t}, \quad B_1^{(1)} = \frac{1}{\mu}. \qquad (П2.10)$$

Экспоненциальное распределение длительности обслуживания заявок существенно упрощает исследование СМО. Кроме того, многие распределения $B(t)$, интересные с практической точки зрения, имеют коэффициент вариации менее единицы. Это означает, что результаты, полученные для экспоненциального распределения, позволяют оценить характеристики исследуемой СМО "сверху" – для пессимистического сценария. Тем не менее, для ряда моделей гипотезу об экспоненциальном распределении длительности обслуживания заявок следует считать очень грубым приближением. Данное утверждение справедливо и для некоторых законов распределения с модой в точке $t = 0$.

Распределения с коэффициентом вариации менее единицы часто описываются при помощи распределения Эрланга $k-го$ порядка. Оно может рассматриваться как частный случай гамма-распределения. Напомним выражение для ФР и математического ожидания:

$$B_2(t) = 1 - e^{-\mu t}\sum_{i=0}^{k-1}\frac{(\mu t)^i}{i!}, \quad B_2^{(1)} = \frac{k}{\mu}. \qquad (П2.11)$$

При $k \to \infty$ распределение Эрланга вырождается. Этот случай рассматривается как самостоятельное распределение – постоянная длительность обслуживания, равная t_0. СМО с постоянным временем обслуживания хорошо формализует процессы работы ряда устройств в сетях электросвязи, основанных на IP-технологии. Распределение времени обслуживания проще записать через преобразование Лапласа-Стилтьеса:

$$\beta_3(s) = e^{-t_0 s}, \quad B_3^{(1)} = t_0. \qquad (П2.12)$$

Распределения с коэффициентом вариации более единицы можно представить при помощи гиперэкспоненциального распределения второго порядка. Данное распределение целесообразно записать в таком виде:

$$B_4(t) = 1 - pe^{-2p\mu t} - (1-p)e^{-2(1-p)\mu t}, \quad B_4^{(1)} = \frac{1}{\mu}. \qquad (П2.13)$$

Распределение (П2.13) задается с ограничением на величину p, которая называется параметром формы: $0 < p < 0,5$. Следующая функция $B(t)$, для которой коэффициент вариации меняется в широких пределах, – распределение Вейбулла-Гнеденко. Для него справедливы соотношения следующего вида:

$$B_5(t) = 1 - e^{-\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^c\right]}, \qquad B_5^{(1)} = a\Gamma\left(\frac{1}{c}+1\right). \qquad (П2.14)$$

Величина a называется параметром масштаба, а переменная c – параметром формы. В этом распределении $a > 0$ и $c > 0$. В формулу для расчета коэффициента вариации входит гамма-функция. Следующее распределение – равномерное на отрезке времени $[a, b]$. Выражения для ФР и среднего значения длительности обслуживания заявок записываются в такой редакции:

$$B_6(t) = \frac{t-a}{b-a}, \quad B_6^{(1)} = \frac{a+b}{2}. \qquad (П2.15)$$

Последнее (седьмое) распределение относится к дискретным. Речь идет об уже упоминавшейся ступенчатой функции, которую удобно записывать через преобразование Лапласа-Стилтьеса. Пусть в точках $i\tau$ ($i = \overline{0, N}$) ФР имеет приращения P_i. Тогда искомые соотношения могут быть представлены следующим образом:

$$\beta_7(s) = \sum_{i=0}^{N} P_i\, e^{-i\tau s}, \quad B_7^{(1)} = \tau \sum_{i=0}^{N} iP_i\ . \qquad (П2.16)$$

Можно привести ряд других примеров. Подробный перечень распределений (не все используются в теории телетрафика) приведен, например, в [6]. В монографии особое внимание будет уделено ступенчатым функциям. Дело в том, что их использование позволяет решить ряд практически важных задач. Правда, в отличие от экспоненциальной и некоторых других функций, для анализа СМО и их совокупности, которая образует сеть массового обслуживания (СеМО), необходимо использовать средства вычислительной техники. Все расчеты могут быть выполнены с помощью персонального компьютера, к которому не предъявляются особые требования ни по производительности, ни по объему оперативной памяти.

Всякое решение плодит новые проблемы.
(Следствие закона Мерфи)

П2.4. Дисциплины обслуживания заявок

Для ряда компонентов современных инфокоммуникационных систем предусмотрена возможность выбора дисциплины обслуживания заявок на этапе проектирования сети или в процессе ее эксплуатации. В некоторых случаях дисциплина (алгоритм) обслуживания заявок заранее определяется на основании международных или национальных стандартов. Иногда выбор дисциплины обслуживания невозможен. Подобная ситуация, как правило, свойственна техническим системам, в которых не используется программное обеспечение. В частности, в декадно-шаговых шаговых и координатных автоматических телефонных

станциях дисциплина обслуживания определялась на этапе разработки оборудования и не менялась в процессе эксплуатации.

Дисциплины обслуживания заявок в СМО классифицируют разными способами. На рисунке П2.7 приведен первый способ классификации. Он хорошо иллюстрирует все основные алгоритмы, используемые в коммутационных станциях телефонной сети.

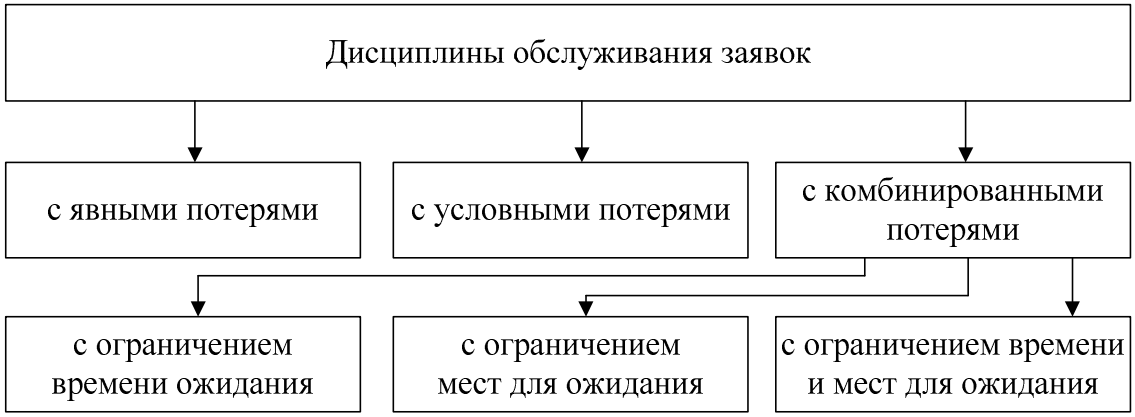


Рисунок П2.7. Первый способ классификации дисциплин обслуживания заявок

Явные потери свойственны, в частности, алгоритмам работы декадно-шаговых телефонных станций. Если отсутствует свободный обслуживающий прибор, то вызов теряется. Абонент практически сразу получает акустический сигнал "Занято". Дисциплина с явными потерями используется и в цифровых коммутационных станциях. В частности, при отсутствии свободных соединительных линий в требуемом направлении (во всех возможных путях установления соединения) вызов также теряется.

Условные потери подразумевают, что при отсутствии свободного обслуживающего прибора заявка ожидает его освобождения. Обычно считается, что условные потери не приводят к отказу в обслуживании. С другой стороны, очевидно, что чрезмерное время ожидания может привести к тому, что абонент сам откажется от попытки вызова. Это значит, что условные потери – некая идеализация реальных процессов обслуживания заявок.

Комбинированные потери позволяют определить более реальные – с практической точки зрения – дисциплины обслуживания заявок. Три из них показаны в нижней части рисунка П2.7. Обслуживание с ограниченным временем ожидания давно используется в телефонных станциях. Например, если Вы слышите акустический сигнал "Ответ станции", но не набираете номер в течение некоторого интервала времени, то обслуживание будет прервано. Вы услышите акустический сигнал "Занято".

С дисциплиной, которая ограничивает число мест для ожидания, многие абоненты сталкиваются при попытке дозвониться до справочной службы местной телефонной сети. Если все места для ожидания заполнены, вежливый голос приносит Вам свои извинения и просит повторить вызов позже. Некоторые справочные системы сочетают оба вида ограничений – по длительности ожидания и числу мест в очереди.

На рисунке П2.8 приведен второй способ классификации. Он более подходит для алгоритмов, используемых в устройствах управления современных систем коммутации. В данном случае классификационным признаком (таксоном) служит тот тип приоритета, который используется для обслуживания заявки.

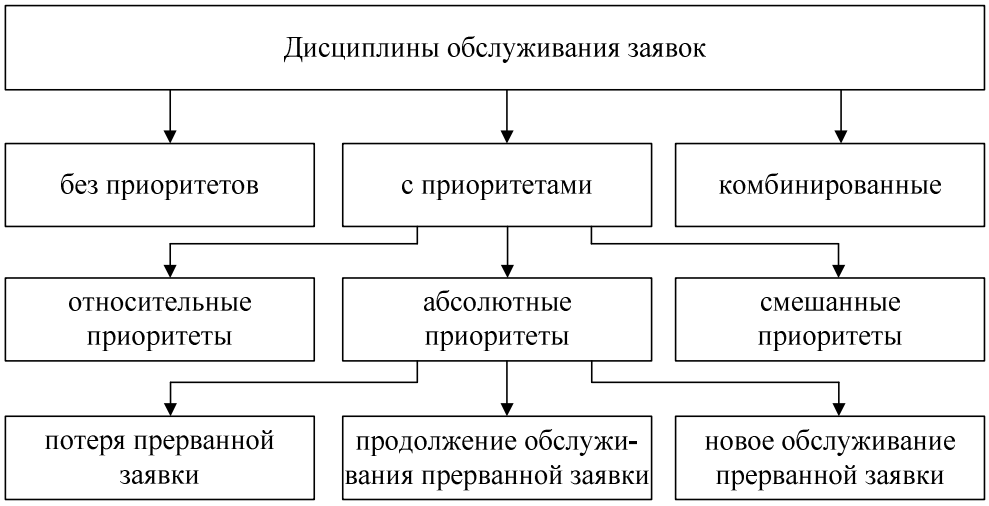


Рисунок П2.8. Второй способ классификации дисциплин обслуживания заявок

Заявки могут обрабатываться без приоритетов. Дисциплина такого рода характерна для устройств управления электромеханических коммутационных станций. Приоритетные стратегии обслуживания заявок можно разделить на три группы, которые следует рассмотреть подробно. Заметим, что комбинированные дисциплины предусматривают переход к приоритетному обслуживанию при определенных условиях (например, резкий рост трафика, приводящий к снижению показателей качества обслуживания).

Для анализа приоритетных стратегий целесообразно ввести простую модель. Все заявки, поступающие в СМО, делятся на группы, которым присваивается приоритет от 1 до N. Заявка с приоритетом j имеет преимущество перед заявками, которым присвоены приоритеты под номерами с $j+1$ до N.

В СМО с относительными приоритетами обслуживание заявок не прерывается. Допустим, заявка с приоритетом j застала все обслуживающие приборы занятыми. Тогда она встает в очередь перед всеми заявками, имеющими более низкий приоритет. Среди заявок с приоритетом j она будет последней.

СМО с абсолютными приоритетами основаны на прерывании обслуживания заявок. Такая возможность предусмотрена для всех случаев, когда обслуживаются заявки более низкого приоритета. При этом (нижняя часть рисунка П2.8) могут использоваться три основных варианта возобновления прерванного процесса обслуживания заявок.

В некоторых СМО используются смешанные приоритеты. Тогда множество $\{J\}$ разбивается на несколько классов – $\{J_1\},\{J_2\},...,\{J_L\}$. Чем меньше индекс у класса из множества $\{J\}$, тем выше абсолютный приоритет у обслуживаемых заявок. В пределах каждого класса $\{J_i\}$ заявкам могут назначаться относительные приоритеты.

Понятие "обслуживание заявок" включает также дисциплины их выбора из очереди. Классификация основных дисциплин выбора заявок на обслуживание приведена на рисунке П2.9. Предлагаемая классификация очень проста. Она включает всего один уровень классификации используемых дисциплин.

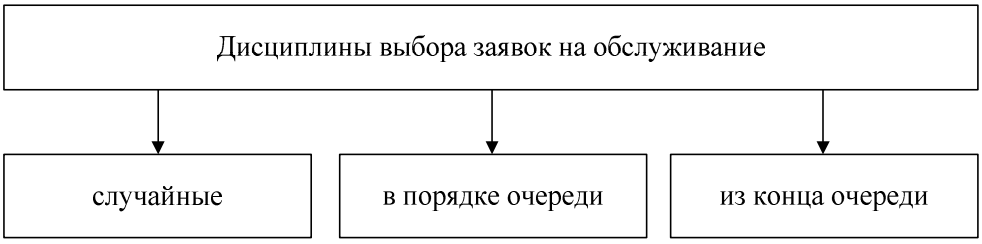


Рисунок П2.9. Классификация дисциплин выбора заявок на обслуживание

Случайный выбор заявок на обслуживание позволяет отказаться от каких-либо процедур формирования очереди. В инфокоммуникационных системах этот алгоритм используется редко. Обслуживание в порядке очереди – классическая дисциплина выбора заявок на обслуживание. Она известна по англоязычным аббревиатурам *FIFO* (First In, First Out) и *FCFS* (First come, first served). Выбор заявки на обслуживание из конца очереди обычно используется в системах, подобных складам, но применяется также и в сетях связи. Эта дисциплина известна по аббревиатурам *LIFO* (Last In, First Out) и *LCFS* (Last come, first served).

Вернемся к рисункам П2.1 и П2.7. Процесс $P(t)$ при обслуживании заявок с явными потерями целесообразно рассматривать как вероятностный. Обычно искомая вероятность оценивается в течение ЧНН. По этой причине функцию $P(t)$ заменяют величиной p, представляющей собой вероятность отказа в обслуживании. Для однолинейных СМО оценка величины p не является сложной задачей. При использовании дисциплин с условными и – особенно – с комбинированными потерями расчет значения p связан с решением весьма сложных задач. Кроме того, для этих двух дисциплин необходим расчет параметров времени ожидания в очереди и задержки (пребывания) заявок в СМО.

Дисциплины обслуживания заявок с приоритетами стимулируют введение сложных конструкций для формализации процесса $P(t)$. Аналогичная ситуация складывается с дисциплинами выбора заявок на обслуживание, классификация которых была приведена на рисунке П2.9.

Соседняя очередь всегда движется быстрее.
(Законы Мерфи. Наблюдение Этторе)

П2.5. Классификация систем массового обслуживания

Используемые ныне принципы классификации СМО базируются на предложениях *Д. Кендалла*, опубликованных в 1951 году. Для описания СМО была предложена запись следующего вида:

$$A / B / n. \qquad (П2.17)$$

Первый символ определяет характер входящего потока заявок. Распределение длительности обслуживания заявок идентифицируется вторым символом. Величина n указывает на количество обслуживающих приборов. В этом Приложении (как, впрочем, и в монографии в целом) рассматриваются, в основном, однолинейные СМО, то есть $n \equiv 1$.

Для конкретизации характера входящего потока заявок и закона распределения длительности их обслуживания вводятся следующие символы:

- M – экспоненциальное распределение. Символ M в позиции "A" говорит о том, что входящий поток является пуассоновским. Если этот символ стоит в позиции "B", то в СМО длительность обслуживания заявок распределена по экспоненциальному закону.
- D – постоянная величина. Если этот символ поставлен в позиции "A", то на вход СМО поступает поток заявок, который нельзя рассматривать как случайный процесс. Символ D в позиции "B" свидетельствует о том, что время обслуживания заявок постоянно.
- E_k – распределение Эрланга $k-го$ порядка. Размещение этого символа в позиции "A" указывает на то, что распределение длительности интервалов между моментами поступления заявок в СМО подчиняется закону Эрланга $k-го$ порядка. Если символ E_k находится в позиции "B", то длительность обслуживания заявок распределена по этому же закону. Напомним, что распределение Эрланга отличается весьма важным свойством. Если $k = 1$, то оно

становится экспоненциальным, а при $k \to \infty$ – вырожденным. Тогда обозначение E_k следует заменить символами M и D соответственно.

- G – распределение общего вида (первая буква в слове "general"). Обычно этот символ указывается в позициях "A" или "B", когда распределение для исследуемого процесса не может быть выражено известными законами. В ряде случаев в позиции "A" используется символ GI. Он подчеркивает тот факт, что входящему потоку свойственно ограниченное последействие.

Ниже будут встречаться и другие обозначения в позициях "A" и "B". В частности, обратившись к соотношениям (П2.13) – (П2.16), можно ввести следующие символы:

- H_2 – гиперэкспоненциальное распределение второго порядка (заменив цифру "2" буквой "k" можно говорить об этом же законе, но $k-го$ порядка);
- WG – распределение Вейбулла-Гнеденко;
- U – равномерное распределение на неком интервале $[a, b]$;
- HD – ступенчатое распределение.

Классификация (П2.17) была вполне приемлемой до появления систем с ожиданием, а также до использования сложных алгоритмов обслуживания заявок, показанных на рисунках П2.7 – П2.9. По мере развития телекоммуникационных сетей усложнились модели СМО, что потребовало дополнения классификации Кендалла. В отечественной научно-технической литературе, как правило, используются дополнения, предложенные профессором *Г.П. Башариным*.

В модифицированной классификации Кендалла вводятся еще две позиции. Для систем с одним обслуживающим прибором можно использовать такое обозначение:

$$A/B/1/r/f_i^j. \qquad (П2.18)$$

Символ "r" в четвертой позиции определяет количество мест для ожидания в очереди. Если $r = 0$, то места для ожидания отсутствуют. Следовательно, рассматривается СМО с явными потерями. Если же в четвертой позиции поставлен символ "∞", то справедливо предположение о том, что заявки никогда не теряются. Целое число r ($0 < r < \infty$) определяет конкретное значение количества мест для ожидания в очереди, которое имеется в исследуемой модели.

Символ f_i^j в пятой позиции позволяет идентифицировать дисциплины постановки заявок в очередь и их выбора для обслуживания. Верхний индекс определяет дисциплину постановки заявок в очередь. При $j = 0$ данный процесс осуществляется без приоритета. Если $j = 2$, то из очереди "вытесняется" заявка, которая имеет более низкий приоритет. Нижний индекс характеризует дисциплину выбора заявок на обслуживание из очереди. Задействуются три значения i:

- $i = 0$ – обслуживание осуществляется без приоритетов;
- $i = 1$ – используются относительные приоритеты;
- $i = 2$ – применяется обслуживание с абсолютными приоритетами.

В зарубежных публикациях чаще применяется иное дополнение классификации Кендалла. Вводятся три новые позиции. Для СМО с одним обслуживающим прибором типична такая запись:

$$A/B/1/K/N/X. \qquad (П2.19)$$

Символ K определяет количество мест для ожидания в очереди. Это означает, что он эквивалентен символу r, введенному в обозначении (П2.18). Символ N указывает на общую численность обслуживаемых пользователей (например, терминалов, включенных в телефонную станцию). Символ X идентифицирует дисциплину обслуживания. Обычно он заменяется сокращением, которое связано с дисциплиной обслуживания. В частности, вместо символа X при использовании дисциплины "первым пришел – первым обслужен" указывается аббревиатура *FIFO*.

Далее в монографии используются обозначения (П2.17) и (П2.18). С учетом записи (П2.18) можно так классифицировать СМО – рисунок П2.10. В данную классификацию включены только системы с одним обслуживающим прибором. Более того, акцентируется внимание на том факте, что основной материал монографии посвящен системам с ожиданием, в которых заявки обслуживаются без приоритетов.

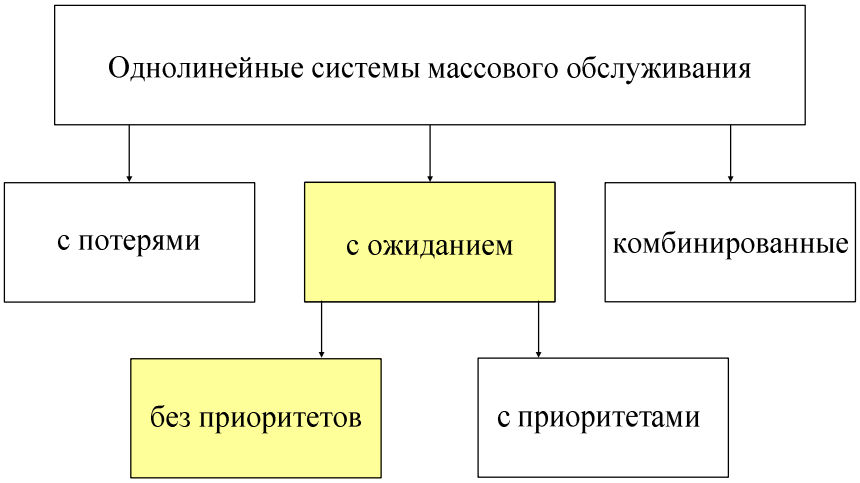


Рисунок П2.10. Классификация систем массового обслуживания

Однолинейные СМО с потерями образуют класс моделей, который используется очень редко. По этой причине в Приложении 2 будут приведены только соотношения, позволяющие рассчитывать основные характеристики подобных СМО. Соответствующий материал полезен с точки зрения уяснения неких общих закономерностей в поведении систем телетрафика.

Человека из массы надо обслуживать массовыми средствами.
(Законы Мерфи. Закон Прайса)

П2.6. Аспекты качества обслуживания

В рекомендации Международного союза электросвязи (МСЭ) Е.800 определены термины, прямо или косвенно относящиеся к качеству обслуживания. Термин "*качество*" определен Международной организацией по стандартизации. Она более известна по сокращению ISO – International Organization for Standardization. Под качеством будем понимать совокупность характеристик объекта (или процесса), которые имеют отношение к его возможностям удовлетворять установленные или предполагаемые потребности. С этой точки зрения формулировка термина "*качество обслуживания*" требует только лишь конкретизации предыдущего определения. Во-первых, подразумеваются характеристики *обслуживания*. Во-вторых, речь должна идти о потребностях пользователя *в услугах связи*.

В английском языке качеству обслуживания соответствует термин *Quality of Service* (QoS). С точки зрения вопросов, которые рассматриваются в монографии, интересен ряд положений, изложенных в рекомендации МСЭ Е.800.

Во-первых, целесообразно остановиться на так называемом "*сквозном качестве обслуживания*". Это словосочетание – перевод с английского языка такого выражения: "end-to-end QoS". Суть термина "сквозное качество обслуживания" удачно иллюстрирует рисунок П2.11, заимствованный из текста рекомендации Е.800. На этом рисунке показаны основные компоненты сети связи, используемые для обмена информацией между двумя пользователями. Окончания нижней стрелки свидетельствуют, что для оценки сквозного качества используется, в том числе, и мнение пользователя. Между компонентами "сеть доступа" и "оконечное оборудование" указаны интерфейсы пользователь-сеть (ИПС). Они важны для постановки некоторых задач по расчету характеристик СеМО.

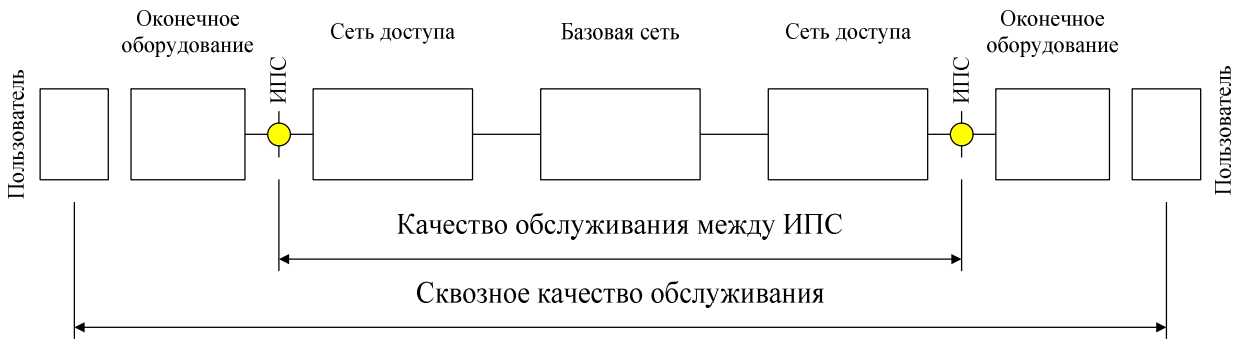


Рисунок П2.11. Основные компоненты телекоммуникационной сети

Во-вторых, следует подчеркнуть мнение МСЭ относительно уже использованного в этом разделе слова "характеристики". Каждая характеристика, так или иначе связанная с качеством обслуживания, должна быть наблюдаемой или измеряемой. В том случае, когда характеристики специфицированы, они становятся параметрами и могут быть выражены показателями (метриками).

Параметром обычно называется количественная характеристика обслуживания с конкретными областью применения и установленными границами. Параметры могут быть объективными и субъективными. В монографии рассматриваются задачи, связанные с объективными параметрами. Типичный пример такого параметра – доля вызовов, которые теряются в течение ЧНН.

В-третьих, для анализа некоторых показателей качества обслуживания используются методы, которые не связаны с теорией телетрафика. В качестве характерного примера подобных показателей следует назвать коэффициент ошибок по битам. Тем не менее, ряд показателей такого рода влияет на оценку параметров, напрямую относящихся к теории телетрафика. Предположим, что все искаженные IP-пакеты переспрашиваются. С точки зрения теории телетрафика это означает, что возрастает среднее значение длительности обслуживания заявок.

В рекомендациях МСЭ, а также в документах ETSI (Европейского института телекоммуникационных стандартов) приведены показатели качества обслуживания для телекоммуникационных сетей различного назначения. Эти показатели связаны не только со сквозным качеством обслуживания. Нормируются также показатели, которые можно разделить на две основные группы. К первой группе относятся показатели, характерные для фрагмента или иерархического уровня телекоммуникационной сети. Примером таких показателей можно считать вероятность потери вызова между телефонными аппаратами одной местной (городской или сельской) телефонной сети. Эта сеть – часть всемирной системы телефонной связи. Во вторую группу входят показатели, относящиеся к процессу обслуживания заявок. В качестве примера такого показателя можно назвать среднее время установления соединения между телефонными аппаратами после завершения процесса набора номера вызывающим абонентом.

Традиционно и МСЭ, и ETSI предлагают нормировать события, заключающиеся в отказе в обслуживании, задавая соответствующую вероятность. В некоторых случаях эта вероятность определяется для разных условий функционирования сети. Когда необходимо нормировать длительность выполнения процесса обычно устанавливаются два параметра. Во-первых, определяется среднее значение длительности выполнения анализируемого процесса. Во-вторых, задается квантиль соответствующей ФР. Ранее чаще встречался $95\% - й$ квантиль. В последнее время широко используются и другие квантили.

С учетом этих соображений основное внимание в монографии уделяется задачам, которые связаны с оценкой параметров для показателей, перечисленных выше. Как было подчеркнуто в тексте до рисунка П2.10, основное внимание акцентируется на системах с ожиданием. По этой причине задачам расчета вероятностей, которые характеризуют отказы в обслуживании, посвящен только один небольшой раздел данного Приложения.

Человек, имеющий одни часы, твердо знает, который час.
Человек, имеющий несколько часов, ни в чем не уверен.
(Закон Сегала)

П2.7. Несколько положений теории телетрафика

Этот раздел Приложения включает только те аспекты теории телетрафика, которые важны с точки зрения вопросов, рассматриваемых в монографии. Таким образом, его нельзя считать кратким изложением базовых положений. Читателям, которые не знакомы с теорией телетрафика, рекомендуется прочесть, хотя бы одну из книг, посвященных этой дисциплине [1 – 5, 10, 11]. В данном разделе мы ограничимся семью положениями.

Первое положение связано с реакцией пользователя на качество обслуживания, характерное для основных этапов предоставления инфокоммуникационных услуг. Далее в качестве примеров таких услуг будут, в основном, рассматриваться виды обслуживания, которые обеспечиваются телефонной сетью общего пользования (ТФОП). Для этой сети будет, при необходимости, конкретизироваться способ распределения информации. Пока в ТФОП используются два способа распределения информации: коммутация каналов и коммутация пакетов.

На рисунке П2.12 показаны основные этапы обслуживания вызова в ТФОП, которые целесообразно выделить для анализа процесса организации связи между терминалами двух пользователей (абонентов). Предположим, что в качестве терминалов используются телефонные аппараты (ТА). Это означает, что процесс обслуживания вызова реализуется на основании типового алгоритма, принятого в ТФОП.

Рисунок П2.12. Основные этапы обслуживания вызова в ТФОП

В момент времени t_1 вызывающий абонент снимает трубку телефонного аппарата. В момент времени t_2 абонент получает информацию (как правило, в виде акустического сигнала, называемого "Ответом станции") о готовности к приему номера вызываемого абонента. К моменту t_3 все цифры, определяющие номер вызываемого абонента, уже получены. Далее осуществляется попытка подключения к линии вызываемого абонента. В период времени между моментами t_4 и t_5 могут выполняться некоторые дополнительные операции, обусловленные, например, правилами оплаты соединения. В большинстве случаев этот период времени равен нулю.

Между моментами времени t_5 и t_6 в терминал вызывающего абонента передаются акустические сигналы "Контроль посылки вызова" или "Занято". Далее предполагается, что терминал вызываемого абонента свободен. В этом случае в терминал вызывающего абонента поступает сигнал "Контроль посылки вызова". В момент времени t_6 происходит снятие микротелефонной трубки вызываемым абонентом. На отрезке времени (t_6, t_7) должен быть создан разговорный тракт.

Отрезок времени (t_7, t_8) – обмен информацией между пользователями. Для ТФОП он эквивалентен обычному телефонному разговору. В момент времени t_8 оба пользователя (или один из них) решают завершить процесс обмена информацией. Промежуток (t_8, t_9) определяет время, которое необходимо для освобождения ресурсов ТФОП, используемых для организации связи между двумя ТА.

Длительность отрезка времени вида (t_i, t_{i+1}) для $1 \le i \le 8$ следует рассматривать как случайную величину. Для каждой величины (например, после проведения измерений) можно определить среднее значение – $t_{i,i+1}^{(1)}$, дисперсию – $\sigma_{i,i+1}^2$ и ряд других характеристик. Более того, для всех случайных величин ФР определена на конечном интервале аргумента t. Для упрощения исследований эмпирические распределения иногда аппроксимируют функциями $F(t)$, которые заданы для $0 \le t < \infty$.

Если время (t_1, t_2) превышает приемлемую для абонента величину, то он не будет удовлетворен обслуживанием. В ряде случаев абоненты даже отказываются от попытки установления соединения. Чтобы избежать подобных ситуаций обычно вводятся два показателя:

- допустимое среднее время задержки получения сигнала "Ответ станции" (то есть, длительности интервала $t_2 - t_1$);
- приемлемая величина $95\% - го$ квантиля распределения этой же случайной величины.

К моменту времени t_3 вызывающий абонент заканчивает процесс набора требуемых цифр. Предположим, что дополнительные операции для установления соединения не нужны, то есть $t_4 = t_5$. Если к моменту времени t_5 вызывающий абонент не получит ни один из акустических сигналов ("Контроль посылки вызова" или "Занято"), то он не будет удовлетворен обслуживанием. Как и для периода времени (t_1, t_2), возможны случаи, когда абоненты отказываются от попытки установления соединения. Для минимизации числа таких ситуаций обычно вводятся два показателя:

- допустимое среднее время задержки после набора номера вызывающего абонента (то есть, длительности интервала $t_5 - t_3$);
- приемлемая величина $95\% - го$ квантиля распределения этой же случайной величины.

Допустим, что в момент времени t_6 вызываемый абонент снял микротелефонную трубку. По очевидным психологическим причинам необходимо, чтобы достаточно быстро в период времени (t_6, t_7) между двумя терминалами был установлен разговорный тракт. По этой причине нормируется среднее значение времени установления разговорного тракта и $95\% - й$ квантиль распределения этой случайной величины. Аналогичные нормы устанавливаются для отрезка времени (t_8, t_9), чтобы оперативно освободить ресурсы ТФОП, которые могут быть использованы для обслуживания других вызовов.

Второе положение касается реакции оборудования сети электросвязи на поведение пользователя. Рассмотрим ситуацию, когда вызывающий абонент получает акустический сигнал "Ответ станции", но не начинает набор номера. В этом случае определенная часть ресурсов ТФОП, предназначенная для группового использования, простаивает. Очевидно, что время ожидания начала набора номера вызываемого абонента, как и длительность пауз между цифрами, следует ограничить. Обычно в коммутационных станциях подобные ограничения выбираются так, чтобы для подавляющего большинства абонентов время, отведенное для начала процесса, было вполне приемлемым.

Тем не менее, в процессе эксплуатации можно оценить долю заявок – x_0, которая будет потеряна из-за превышения времени ожидания начала процесса – t_{max}. Величину t_{max} можно считать квантилем распределения времени ожидания, который определен для значения ФР, равного $1 - x_0$. Ограничения такого рода могут применяться и на отрезке времени (t_7, t_8) при поддержке некоторых видов услуг. Характерным примером подобных услуг можно считать обращения абонентов в центры обслуживания вызовов.

Третье положение связано с понятием "период занятости". ФР соответствующей случайной величины обозначается как $G(t)$. Для объяснения сущности периода занятости обратимся к рисунку П2.13. Предположим, что система находится в работоспособном состоянии. Тогда она будет либо обслуживать заявки, либо простаивать.

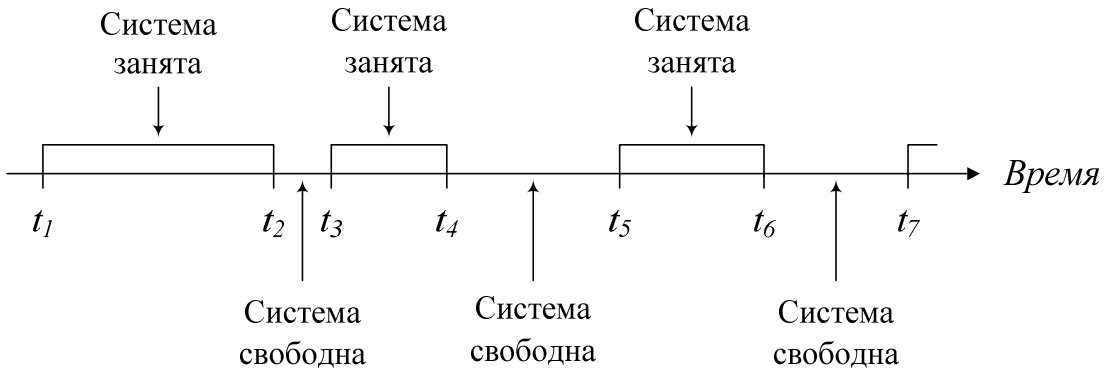


Рисунок П2.13. Периоды занятости системы массового обслуживания

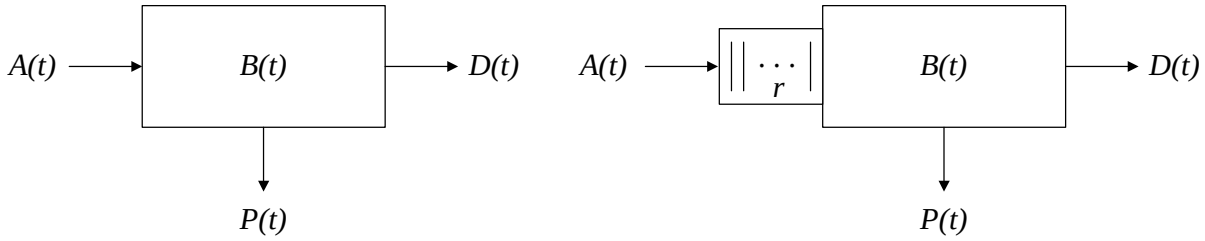
Интервалы (t_1, t_2), (t_3, t_4) и (t_5, t_6) называются периодами занятости. Интервалы (t_2, t_3), (t_4, t_5) и (t_6, t_7) именуются, соответственно, периодами простоя. Очевидно, что период занятости начинается в момент времени, когда в свободную систему поступает на обслуживание первая заявка. Он заканчивается, когда последняя заявка (из общего числа поступивших за период занятости) покидает систему, а очередь на обслуживание при этом отсутствует. Длительность периода занятости – случайная величина, для которой в ряде задач по исследованию СМО необходимо найти ФР – $G(t)$.

В некоторых случаях достаточно определить преобразование Лапласа-Стилтьеса данной функции распределения – $\gamma(s)$. Для однолинейных систем вида $M/G/1$ искомое преобразование определяется так:

$$\gamma(s) = \beta\left[s + \lambda - \lambda\gamma(s)\right]. \qquad (П2.20)$$

Величина λ – интенсивность входящего потока заявок. Вид соотношения (П2.20) свидетельствует, что получение функции $G(t)$ представляет собой нетривиальную задачу. Для некоторых видов функции $B(t)$ распределения $G(t)$ приведены в Приложении 6.

Четвертое положение иллюстрирует одно важное различие между алгоритмами обслуживания заявок с явными потерями и с ожиданием. Для объяснения этого различия обратимся к рисунку П2.14. В его левой части показана модель СМО, которая не содержит мест для ожидания начала обслуживания. Если заявка приходит в течение периода занятости, то она теряется. В правой части изображена модель СМО, на входе которой установлен буферный накопитель емкостью r. Он хранит заявки, пришедшие в систему за период занятости.



а) Обслуживание с явными потерями б) Обслуживание с ожиданием

Рисунок П2.14. Две модели систем массового обслуживания

Для модели системы с явными потерями допустимо условие такого рода: $\lambda > \mu$. В подобных случаях значительная часть заявок будет теряться (некоторые численные оценки приведены в следующем разделе). Тем не менее, можно утверждать, что СМО будет функционировать устойчиво. Это утверждение нельзя считать верным для систем с ожиданием. При $\lambda > \mu$ очередь будет расти до величины r. Анализ систем, в которых используется дисциплина обслуживания с ожиданием, как правило, ограничивается следующим условием: $\lambda < \mu$. Основные соотношения для СМО с ожиданием получены именно для такого режима их функционирования. Во многих соотношениях для моделей с ожиданием фигурирует величина ρ – нагрузка (в некоторых работах она называется загрузкой):

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}. \qquad \text{(П2.21)}$$

Неравенство $\lambda < \mu$ эквивалентно правилу $\rho < 1$. Все выражения, которые далее будут приведены ниже, основаны на соблюдении условия: $\rho < 1$.

Пятое положение касается двух этапов функционирования СМО, использующих дисциплину обслуживания заявок с ожиданием. Подобные дисциплины предусматривают возможность формирования очереди. Очевидно, что для моделей с явными потерями время ожидания начала обслуживания и длина очереди тождественно равны нулю.

В СМО с ожиданием для всех заявок целесообразно выделить две фазы:

- ожидание в очереди – W;
- собственно обслуживание – B.

Длительность каждой фазы целесообразно рассматривать как случайную величину. В тексте монографии рассматриваются модели, для которых можно вычислить значения математического ожидания – $W^{(1)}$ и $B^{(1)}$, а также дисперсии – σ_W^2 и σ_B^2 обеих случайных величин.

Длительность ожидания и обслуживания образует некий отрезок времени, который называется задержкой заявок в СМО. В ряде публикаций используется термин "время пребывания". Далее этот отрезок времени обозначается буквой "S".

Обычно время задержки заявок исследуется как случайная величина. Причем ее компоненты (ожидание и обслуживание) часто рассматриваются как взаимно независимые случайные величины. Практический интерес представляют математическое ожидание времени задержки заявок в системе – $S^{(1)}$, дисперсия – σ_S^2 и ФР – $S(t)$. На основании правил, установленных для взаимно независимых случайных величин, можно записать три важных соотношения:

$$S^{(1)} = W^{(1)} + B^{(1)}, \quad \sigma_S^2 = \sigma_W^2 + \sigma_B^2, \quad \xi(s) = \omega(s) \cdot \beta(s). \qquad \text{(П2.22)}$$

Шестое положение связано с процессом $D(t)$, который определяет характер потока заявок, покидающих СМО. Этот процесс был показан на рисунке П2.1. Интерес к нему обусловлен тем, что зачастую он определяет характер потока заявок, который является входящим для следующих СМО. Соответствующая модель показана на рисунке П2.15. Она включает три фазы обслуживания заявок. Каждая $i-я$ фаза состоит из нескольких СМО – K, L и M соответственно.

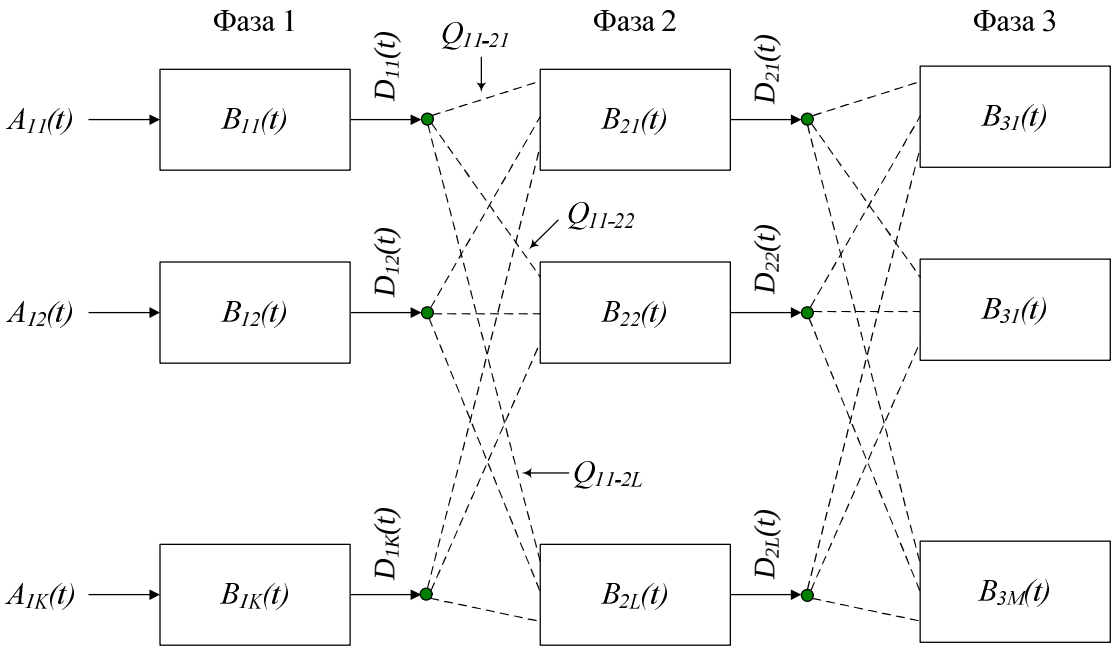


Рисунок П2.15. Модель для определения процесса $D(t)$

На выходе СМО формируется выходящий поток заявок. Для распределения $D(t)$ получено преобразование Лапласа-Стилтьеса – $\delta(s)$ при условии, что входящий поток является пуассоновским:

$$\delta(s) = \frac{\lambda + \rho s}{s + \lambda}\beta(s). \qquad (П2.23)$$

Из выражения (П2.23) несложно получить формулу для коэффициента вариации длительности интервалов между моментами покидания заявками системы вида $M/G/1$ – v_D:

$$v_D = \sqrt{1 - \rho^2\left(1 - C_B^2\right)}. \qquad (П2.24)$$

Близость значения v_D к единице не может рассматриваться как достаточное условие для соответствия ФР $D(t)$ экспоненциальному закону распределения. С другой стороны, приближенное равенство $v_D \approx 1$ – необходимое условие для аппроксимации функции $A(t)$ экспоненциальным законом. Величина v_D близка к единице в двух случаях:

- нагрузка СМО очень мала ($\lambda << \mu$);
- коэффициент вариации времени обслуживания заявок в СМО очень близок к единице.

После некоторых СМО заявки продвигаются дальше. Для описания этих операций используется модель в виде СеМО. Именно такая модель показана на рисунке П2.15. Для первой системы на фазе 1 обозначены вероятности Q_{ab-cd}. В рассматриваемом примере $a = b = 1$, $c = 2$, $d = \overline{1, L}$. Вероятности Q_{ab-cd} определяют доли заявок, которые будут направлены в другие системы (на следующие фазы обслуживания).

Седьмое положение посвящено процессам объединения и просеивания потоков. Для их анализа воспользуемся простой моделью, приведенной на рисунке П2.16. На вход СМО поступает поток заявок, создаваемый N источниками. Процесс $R(t)$ определяет вид тех операций, которые изменяют характеристики суммарного потока заявок.

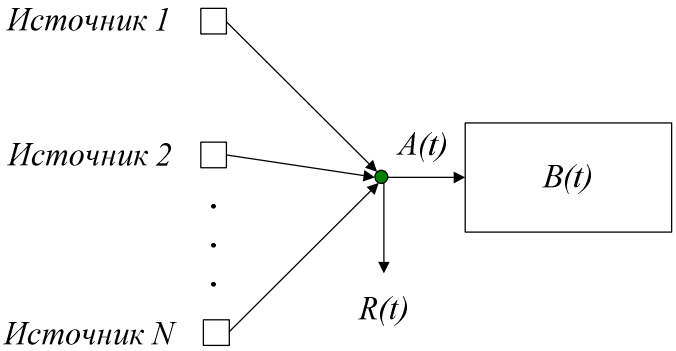


Рисунок П2.16. Объединение и просеивание потоков

Сначала рассмотрим случай, когда процесс $R(t)$ не реализуется. Это значит, что ФР $A(t)$ определяется для потока заявок, который генерируется N источниками. Допустим, что каждый из N потоков заявок может считаться пуассоновским. Пусть интенсивность $i-го$ источника $\left(i=\overline{1,N}\right)$ равна λ_i. Тогда суммарный входящий поток заявок также будет пуассоновским с интенсивностью λ, определяемой такой суммой:

$$\lambda=\sum_{i=1}^{N}\lambda_i. \qquad (П2.25)$$

Следовательно, распределение $A(t)$ будет экспоненциальным – выражение (П2.7). Это свойство пуассоновских потоков заметно упрощает решение ряда практических задач. Еще одно важное свойство суммирования нескольких потоков заявок связано с тем, что при соблюдении некоторых условий распределение $A(t)$ также будет экспоненциальным. Предположим, что объединяется большое число стационарных ординарных потоков (с любым характером последействия). Необходимо, чтобы параметр каждого из N потоков (напомним, что этот показатель не всегда совпадает с интенсивностью) был невелик. В этом случае правомерна гипотеза о близости суммарного потока заявок к пуассоновскому. Оценку ошибок расчета характеристик СМО при замене реального распределения $A(t)$ экспоненциальным законом можно рассматривать как одно из важных направлений исследований в теории телетрафика.

Рассмотрим влияние двух видов процесса $R(t)$ на характер потока заявок. Первый вид процесса $R(t)$ заключается в том, что заявка, поступающая в систему, теряется с вероятностью $(1-p)$. Тогда, с вероятностью p заявка попадает на обслуживание. Поток этих заявок называют просеянным. Процесс его получения называется рекуррентной операцией просеивания. Второй вид процесса $R(t)$ базируется на другом алгоритме просеивания. Ровно k заявок отбрасываются. Следующая заявка (под номером $k+1$) попадает на вход СМО. Затем снова отбрасываются k следующих заявок и так далее.

Предположим, что гипотеза о том, что суммарный поток заявок может считаться пуассоновским, вполне приемлема. Тогда – при использовании рекуррентной операции просеивания – на вход системы будет поступать пуассоновский поток заявок с интенсивностью $p\lambda$. Этот факт очень важен для исследования моделей СеМО. Часто заявка после завершения обслуживания с вероятностью p_j попадает в $j-ю$ систему. Следовательно, на вход $j-й$ системы будет поступать пуассоновский поток заявок с интенсивностью $p_j\lambda$. Реализация процесса $R(t)$ второго вида приводит к формированию потока Эрланга $k-го$ порядка.

Нет невыполнимой работы для человека,
который не обязан делать ее сам.
(Законы Мерфи. Закон Вейлера)

П2.8. Однолинейная система с явными потерями

С практической точки зрения однолинейные системы с явными потерями интересны, пожалуй, только для анализа характеристик качества обслуживания при подключении нескольких телефонных терминалов к общей абонентской линии. В настоящее время в ТФОП применяется спаренное подключение двух терминалов к одной абонентской линии. Ранее в развивающихся странах встречались случаи использования одной абонентской линии восемью терминалами. Однолинейные системы с явными потерями более интересны с теоретической точки зрения. Далее длительность обслуживания заявок в однолинейной системе с явными потерями предполагается случайной величиной, распределенной по экспоненциальному закону.

Прежде всего, необходимо ввести понятие *пуассоновского потока второго рода*. Этот поток генерируется конечным числом источников трафика. Согласно записи (П2.19) количество источников трафика будет обозначаться как N. Для пуассоновского потока второго рода справедливо соотношение (П2.7), но параметр потока – λ_i зависит еще от двух переменных. Первая переменная – параметр потока заявок свободного источника – a. В качестве второй переменной фигурирует количество активных источников трафика – i. Величина λ_i определяется следующим соотношением [3]:

$$\lambda_i = (N - i)\alpha, \quad i \le N. \qquad \text{(П2.26)}$$

Из этого соотношения следует, что когда все источники трафика активны, параметр потока равен нулю. Введем единый параметр интенсивности трафика – Y. Эта величина, по аналогии с формулой (П2.21), вычисляется так:

$$Y = \frac{\alpha}{\mu}. \qquad \text{(П2.27)}$$

С учетом этих обозначений для однолинейной системы вероятность потери вызова – π_C можно получить из формулы Энгсета [3] при условии, что количество приборов для обслуживания трафика (V) равно единице:

$$\pi_C = \frac{C_{N-1}^1 Y}{C_{N-1}^0 + C_{N-1}^1 Y} = \frac{(N-1)Y}{1 + (N-1)Y}. \qquad \text{(П2.28)}$$

Для расчета вероятности потерь по времени – π_T и по нагрузке – π_Y справедливы соотношения такого вида:

$$\pi_T = \frac{C_N^1 Y}{C_N^0 + C_N^1 Y} = \frac{NY}{1 + NY}, \qquad \text{(П2.29)}$$

$$\pi_Y = \left(1 - \frac{1}{N}\right)\pi_T = \frac{(N-1)Y}{1 + NY}. \qquad \text{(П2.30)}$$

Очевидно, что при $Y < \infty$ и $N < \infty$ справедливо такое неравенство: $\pi_Y < \pi_C < \pi_T$. Этим системы с входящим пуассоновским потоком второго рода отличаются от модели Эрланга [3], для которой справедливо равенство потерь по вызовам (p_C), по времени (p_T) и по нагрузке (p_Y). По этой причине соответствующую вероятность обозначают буквой "p" без нижнего индекса. Потери для модели Эрланга при $V = 1$ и интенсивности трафика $Y_Э$ рассчитываются по следующей формуле:

$$p = \frac{Y_Э}{1 + Y_Э}. \qquad (П2.31)$$

С учетом принятых обозначений $Y_Э = NY$. Тогда последнее выражение можно переписать в ином виде:

$$p = \frac{NY}{1 + NY}. \qquad (П2.32)$$

Следовательно, искомая величина совпадает с вероятностью потерь по времени для модели Энгсета. Эта вероятность, обозначенная как π_T, превышает аналогичные оценки потерь по вызовам и по нагрузке. Таким образом, более простая модель Эрланга позволяет получить точную (для потерь по времени) или верхнюю границу (для потерь по вызовам и по нагрузке) оцениваемой вероятности. В таблице П2.1 приведены результаты расчетов вероятностей p, π_T, π_C и π_Y для двух величин Y при четных значениях N от двух до восьми.

Таблица П2.1. Вероятности потерь для ряда значений Y и N

Вероятности	$N = 2$	$N = 4$	$N = 6$	$N = 8$
$Y = 0,05$				
$p\ (\pi_T)$	0,090909	0,166667	0,230769	0,285714
π_C	0,047619	0,130435	0,200000	0,259259
π_Y	0,045455	0,125000	0,192308	0,250000
$Y = 0,15$				
$p\ (\pi_T)$	0,230769	0,375000	0,473684	0,545454
π_C	0,130435	0,310345	0,428571	0,512195
π_Y	0,115385	0,281250	0,394737	0,477273

Несложно убедиться, что при $Y \to 0$ и конечных значениях N все вероятности стремятся к нулю. Также просто определить, что все вероятности стремятся к единице при конечном значении Y и $N \to \infty$.

Интересны ошибки, которые возникают при замене формул (П2.28) и (П2.30) соотношением (П2.32), основанном на менее точной модели. Относительные ошибки при расчетах вероятностей π_C и π_Y (δ_C и δ_Y соответственно) определяются следующими формулами:

$$\delta_C = -\frac{1}{(N-1)(1+NY)}, \qquad (П2.33)$$

$$\delta_Y = -\frac{1}{N-1}. \qquad (П2.34)$$

Из этих формул следует, что $\delta_C \le \delta_Y$. Величины ошибок близки друг к другу при малых значениях Y. Относительная ошибка δ_C должна рассматриваться как функция, зависящая и от Y, и от N. Относительная ошибка δ_Y определяется только величиной N. Функции $\delta_Y = f(N)$ и $\delta_C = f(Y, N)$ определены для $N \ge 2$.

На рисунке П2.17 приведен ряд кривых для оценки относительной ошибки при расчетах вероятностей π_C и π_Y по формуле (П2.32). Все кривые построены для модулей величин δ_C и δ_Y. Значения δ_C и δ_Y указаны по оси ординат в логарифмическом масштабе.

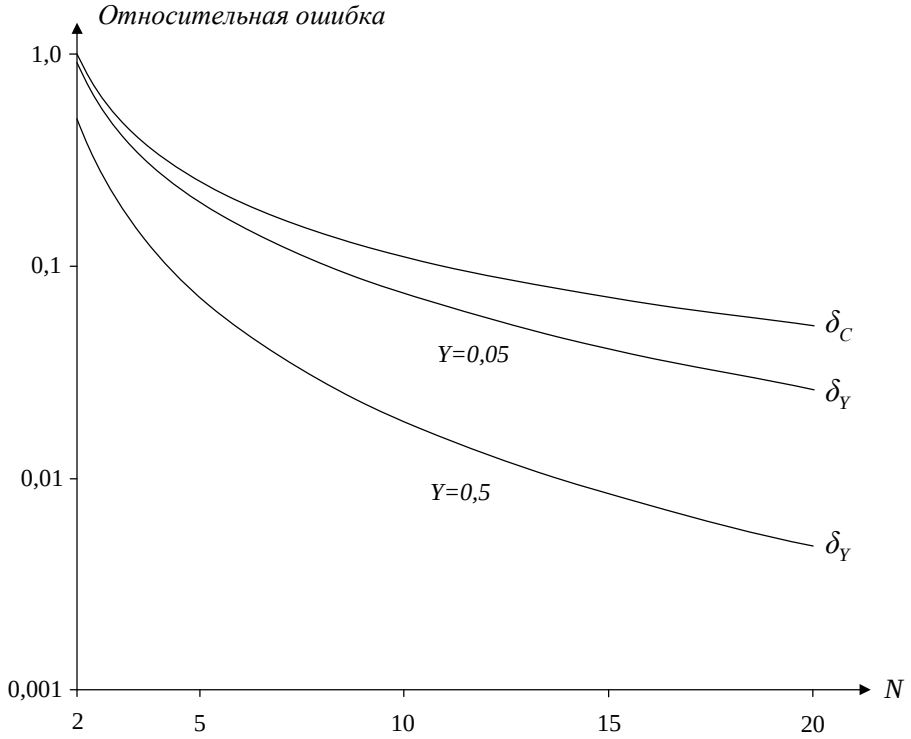


Рисунок П2.17. Оценки относительной ошибки при расчете вероятностей π_C и π_Y

Из соотношения (П2.34) можно определить количество источников трафика – N_{MIN}, начиная с которого переход к модели Эрланга не приводит к ошибке – по модулю – более заданного порога – δ_{MAX}:

$$N_{MIN} = \left\lceil \frac{1-\delta_{MAX}}{\delta_{MAX}} \right\rceil. \qquad (П2.35)$$

Знак $\lceil\ \rceil$ указывает на то, что результат деления округляется до большего целого значения.

Обычно компоненты сетей электросвязи, исследуемые как однолинейные системы, рассчитываются на сравнительно малые величины интенсивности нагрузки. По этой причине в качестве меры относительной ошибки, обусловленной переходом к модели Эрланга, следует использовать соотношение (П2.35).

Никогда не ставьте задачу,
решение которой вам неизвестно.
(Законы Мерфи. Правило Берке)

П2.9. Две простейшие системы с ожиданием

В этом разделе содержатся результаты, позволяющие оценивать качество работы технических средств, которые можно анализировать методами теории телетрафика для двух простейших систем с ожиданием. Подобные задачи будем называть *прямыми*. *Обратные* задачи связаны с расчетом характеристик СМО по заданным показателям качества их функционирования. Пусть y – некий гипотетический показатель качества работы компонента сети электросвязи, для оценки которого приемлемы методы теории телетрафика. Предположим, что данный показатель связан с параметром x прямо пропорциональной зависимостью:

$$y = ax + b. \qquad (П2.36)$$

Допустим, что величина x равна производительности исследуемого компонента сети электросвязи. Если коэффициент пропорциональности – a и константа – b известны, то прямая задача представляет собой процесс вычисления по формуле (П2.36). Обратной задачей будет поиск значения x. Для выбранного примера величина x вычисляется элементарно:

$$x = \frac{y-b}{a}. \qquad (П2.37)$$

При исследовании СМО и прямым, и обратным задачам свойственна практическая ценность. Эти задачи легче решать для простых моделей телетрафика. К таким моделям относятся системы, для которых приемлема гипотеза о том, что входящий поток заявок можно считать пуассоновским. В этой группе моделей обычно выделяют еще более простые СМО. В частности, если распределение $B(t)$ представимо экспоненциальным законом, то анализ модели упрощается. Такая модель, обозначаемая в классификации Кендалла как $M/M/1$, позволяет получить все характеристики СМО, интересные с практической точки зрения. Чуть более сложная модель – однолинейная система с постоянной длительностью обслуживания заявок: $M/D/1$. Этим системам, присущи два следующих свойства:

- количество мест для ожидания в очереди может считаться бесконечным;
- все заявки обслуживаются без приоритетов по правилу "первым пришел – первым обслужен".

Ниже приводятся некоторые характеристики, полученные для обеих систем. Для подробного изучения этих характеристик целесообразно воспользоваться монографиями [2, 11, 12] или другими публикациями. Начнем с модели $M/M/1$.

Напомним, что анализ всех видов систем с ожиданием выполняется для следующей области изменения нагрузки:

$$0 \le \rho < 1. \qquad (П2.38)$$

Величины p_k ($k \ge 0$) определяют вероятности того, что в однолинейной системе находятся ровно k заявок. Они называются вероятностями состояний. Очевидно, что p_0 – вероятность того, что в системе нет ни одной заявки. Если $k=1$, то рассматривается состояние, при котором в СМО находится одна заявка, которая обслуживается. Очередь отсутствует. При $k \ge 2$ вероятность p_k характеризует состояние СМО, когда очередь состоит из $(k-1)$ заявок. При этом одна заявка (самая первая из пришедших в систему) обслуживается. Для расчета вероятностей состояний справедливо такое соотношение:

$$p_k = (1-\rho)\rho^k. \qquad (П2.39)$$

Очевидно, что $p_k > p_{k+1}$. Распределение вероятностей p_k является геометрическим [6]. Из соотношения (П2.39) несложно получить важные характеристики для моделей телетрафика: среднее значение количества заявок, находящихся в системе – $N^{(1)}$, а также дисперсию этой случайной величины – σ_N^2:

$$N^{(1)} = \frac{\rho}{1-\rho}, \qquad (П2.40)$$

$$\sigma_N^2 = \frac{\rho}{(1-\rho)^2}. \qquad (П2.41)$$

Для нахождения ряда других характеристик однолинейных систем полезна *формула Литтла*. Она связывает величину $N^{(1)}$, интенсивность пуассоновского потока заявок – λ и время их задержки (ожидание плюс обслуживание) в системе – $S^{(1)}$:

$$N^{(1)} = \lambda S^{(1)}. \qquad (П2.42)$$

Иногда формулу Литтла записывают в иной редакции. Если $N_w^{(1)}$ и $W^{(1)}$ обозначают средние значения длины очереди и длительности ожидания, то справедливо следующее соотношение:

$$N_w^{(1)} = \lambda W^{(1)}. \qquad (П2.43)$$

Из последних формул выводятся выражения для вычисления средних значений длительности ожидания заявок в очереди и их пребывания в однолинейной системе:

$$W^{(1)} = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)}, \qquad (П2.44)$$

$$S^{(1)} = \frac{1}{\mu(1-\rho)}. \qquad (П2.45)$$

Время ожидания начала обслуживания и время пребывания в системе по своей природе следует рассматривать как случайные величины. Полная информация об этих величинах может быть получена из соответствующих ФР – $W(t)$ и $S(t)$. Для исследуемой модели искомые распределения определяются так:

$$W(t) = 1 - \rho e^{-(1-\rho)\mu t}, \qquad (П2.46)$$

$$S(t) = 1 - e^{-(1-\rho)\mu t}. \qquad (П2.47)$$

На рисунке П2.18 приведены два графика, которые иллюстрируют зависимость средних значений количества заявок в системе и времени пребывания при разных величинах нагрузки. Оба эти параметра при приближении нагрузки к единице возрастают до бесконечности. При построении графиков принято, что $\mu = 1$.

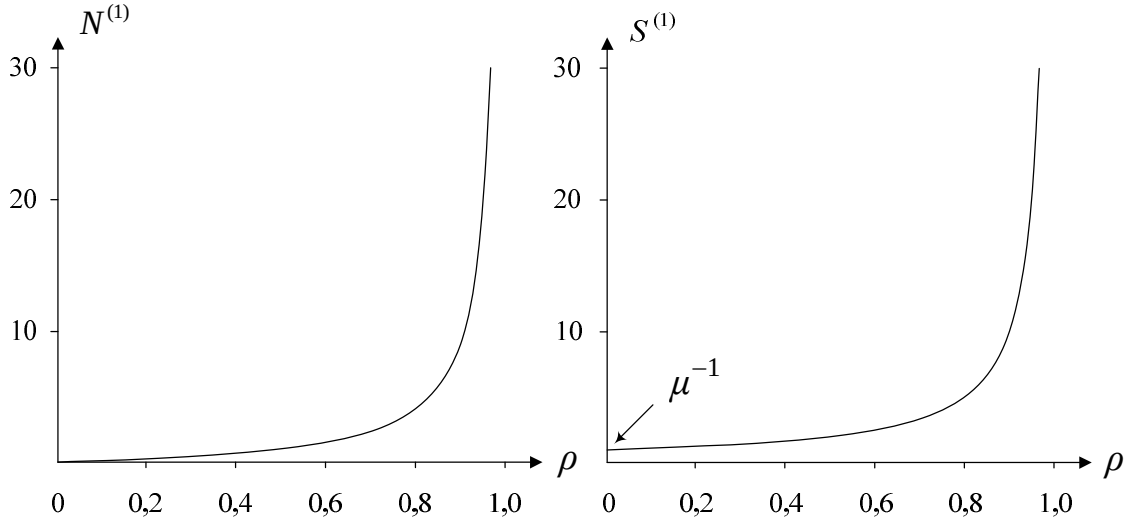


Рисунок П2.18. Зависимость параметров $N^{(1)}$ и $S^{(1)}$ от нагрузки системы

На рисунке П2.19 изображена дополнительная ФР длительности ожидания начала обслуживания для трех значений нагрузки ρ. По оси абсцисс отложено время, деленное на среднее значение длительности обслуживания заявок – $B^{(1)}$. Оно принято за единицу. Тогда нагрузка ρ численно равна величине интенсивности входящего потока заявок – λ. Подобный подход часто используется для построения графиков, иллюстрирующих поведение характеристик СМО.

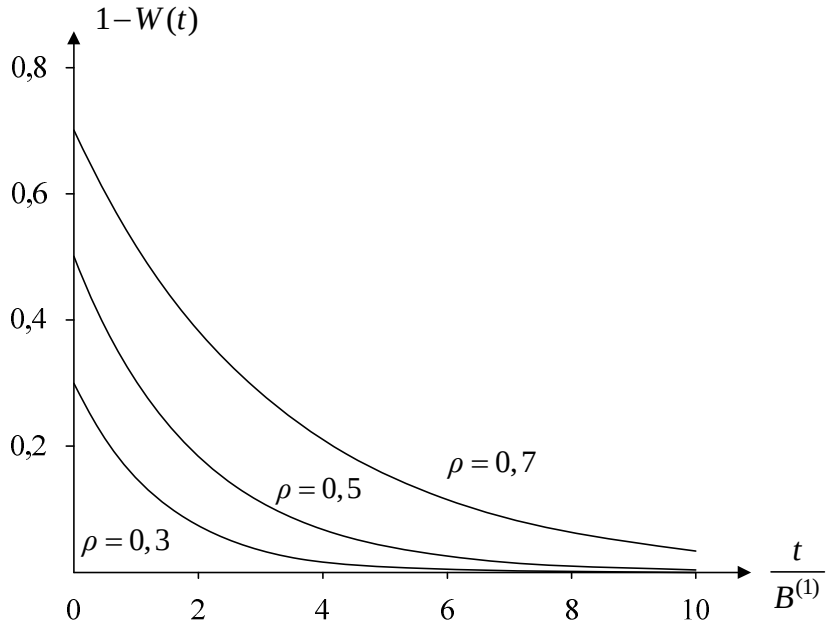


Рисунок П2.19. Дополнительная функция распределения длительности ожидания

Все приведенные выше выражения для расчета характеристик систем класса $M/M/1$ отличаются простотой. Для распределения длительности периода занятости это утверждение нельзя считать корректным. Первая производная от соответствующей ФР представима в следующей форме:

$$\frac{dG(t)}{dt} = \frac{1}{t\sqrt{\rho}} I_1(2t\sqrt{\lambda\mu}) e^{-(\lambda+\mu)t}. \qquad (П2.48)$$

Здесь $I_1(t)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода и первого порядка [13].

Для системы $M/M/1$ преобразование Лапласа-Стилтьеса времени обслуживания заявок определяется следующим соотношением:

$$\beta(s) = \frac{\mu}{s+\mu}. \qquad (П2.49)$$

Подставляя это соотношение в формулу (П2.23), получаем важное соотношение такого рода:

$$\delta(s) = \frac{\lambda}{s+\lambda}. \qquad (П2.50)$$

Это означает, что поток заявок, которые покидают систему $M/M/1$ после их обслуживания, остается пуассоновским с интенсивностью λ. Данное обстоятельство существенно упрощает исследование СеМО. Интерес к модели $M/M/1$ обусловлен, в том числе, и воспроизведением пуассоновского потока заявок на выходе системы.

Актуальность модели $M/D/1$ объясняется, как правило, двумя обстоятельствами. Во-первых, для распределений $B(t)$ с коэффициентом вариации менее единицы системы $M/M/1$ и $M/D/1$ позволяют получить верхнюю и нижнюю оценки для параметров, которые интересны с теоретической и с практической точек зрения. Во-вторых, в сетях, основанных на пакетных технологиях, гипотеза о постоянном времени обслуживания заявок (передачи и обработки информационных блоков) выглядит вполне обоснованным предположением.

Среднее значение количества заявок, находящихся в системе вида $M/D/1$, рассчитывается по следующей формуле:

$$N^{(1)} = \frac{\rho}{1-\rho} - \frac{\rho^2}{2(1-\rho)}. \qquad (П2.51)$$

Второй член представляет собой максимум абсолютной ошибки, обусловленной заменой модели $M/G/1$ – при условии, что коэффициент вариации для распределения $B(t)$ меньше единицы – системами $M/M/1$ и $M/D/1$. В качестве относительной ошибки можно выбрать отношение второго члена в выражении (П2.51) к значению $N^{(1)}$, которое определяется соотношением (П2.40). Тогда искомая ошибка составляет $0,5\rho$.

Важное свойство модели $M/D/1$ заключается в том, что длительность ожидания в очереди составляет ровно половину от аналогичной величины для системы $M/M/1$:

$$W^{(1)} = \frac{\rho}{2\mu(1-\rho)}. \qquad (П2.52)$$

Для вычисления среднего времени задержки заявок в системе $M/D/1$ необходимо к величине $W^{(1)}$ прибавить значение $B^{(1)}$, равное μ^{-1}:

$$S^{(1)} = \frac{2-\rho}{2\mu(1-\rho)}. \qquad (П2.53)$$

В системе $M/D/1$ задержка не может быть меньше величины $B^{(1)}$, что обусловлено логикой функционирования любого компонента в составе сети связи. Математически данное положение следует из соотношения (П2.53) при $\rho = 0$.

ФР длительности ожидания заявок в очереди для систем с постоянным временем обслуживания была получена *Кроммелином*:

$$W(t) = (1-\rho)\sum_{k=0}^{\lfloor \mu t \rfloor} \frac{\left[\lambda\left(\frac{k}{\mu} - t\right)\right]^k}{k!} e^{\lambda\left(t - \frac{k}{\mu}\right)}. \qquad (П2.54)$$

Знак $\lfloor\ \rfloor$ указывает на то, что от результата деления берется целое значение. Зная распределение $W(t)$, несложно вычислить ФР длительности задержки заявок в системе вида $M/D/1$:

$$S(t) = \begin{cases} 0, \ \textit{при } t < B^{(1)}, \\ W\left(t - B^{(1)}\right), \ \textit{при } t \ge B^{(1)}. \end{cases} \qquad (П2.55)$$

Для рассматриваемой модели существенно проще – по сравнению с соотношением для системы $M/M/1$ – выглядит выражение для ФР длительности периода занятости [14]:

$$G(t) = \begin{cases} 0, \ \textit{при } t \le B^{(1)}, \\ \sum_{i=1}^{\left\lceil \frac{t}{B^{(1)}} \right\rceil} \frac{(i\rho)^{i-1}}{i!} e^{-i\rho}, \ \textit{при } t > B^{(1)}. \end{cases} \qquad (П2.56)$$

Равенство нулю функции $G(t)$ при $t \le B^{(1)}$ обусловлено особенностью СМО вида $M/D/1$. Система, после поступления первой заявки, не может освободиться ранее, чем закончится время $B^{(1)}$.

Характер зависимости $S^{(1)}$ и $W^{(1)}$ от нагрузки для рассматриваемой модели такой же, как и для системы $M/M/1$. Заметно отличается поведение функции $W(t)$ – рисунок

П2.20. На этом рисунке изображены три кривые дополнительной ФР $W(t)$ для разных значений нагрузки. Ось абсцисс выбрана по правилам, которые приняты для предыдущей иллюстрации. Для оси ординат используется логарифмическая шкала.

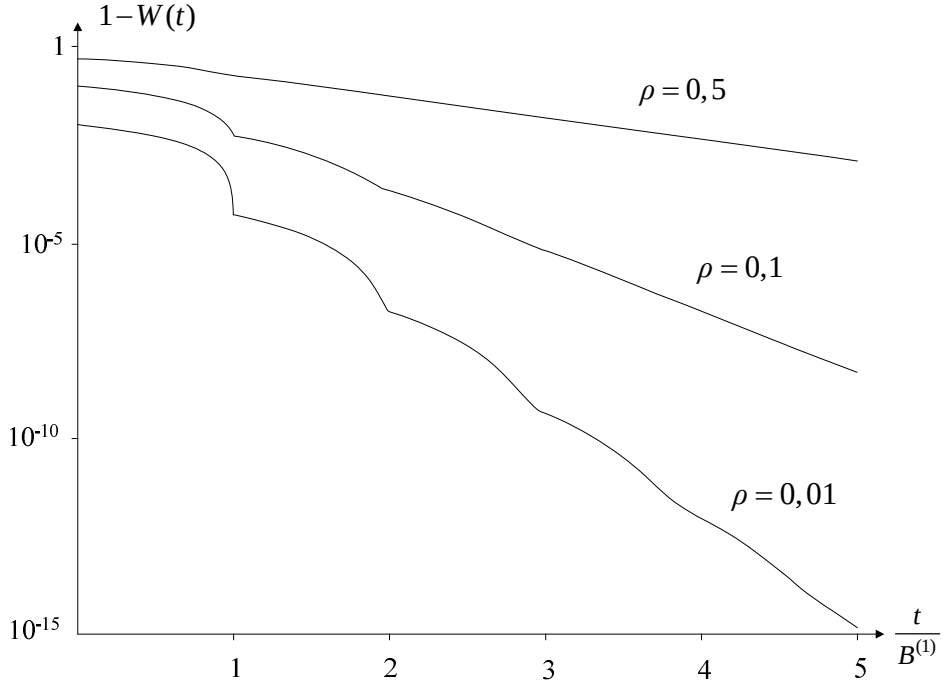


Рисунок П2.20. Дополнительная функция распределения $W(t)$

Специфический характер кривых $W(t)$ обусловлен особенностью функции $B(t)$ для рассматриваемой модели СМО.

Литература к Приложению 2

1. Г.П. Башарин. Лекции по математической теории телетрафика. – М.: РУДН, 2009.
2. Л. Клейнрок. Теория массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1979.
3. Ю.Н. Корнышев, А.П. Пшеничников, А.Д. Харкевич. Теория телетрафика. – М.: Радио и Связь, 1996.
4. Б.С. Лившиц, Я.В. Фидлин, А.Д. Харкевич. Теория телефонных и телеграфных сообщений. – М.: Связь, 1971.
5. Б.С. Лившиц, А.П. Пшеничников, А.Д. Харкевич. Теория телетрафика. – М.: Связь, 1979.
6. Р.Н. Вадзинский. Справочник по вероятностным распределениям. – СПб.: Наука, 2001.
7. Е.С. Вентцель. Теория вероятностей. – М.: издательский центр "Академия", 2005.
8. И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.: Наука, 1986.
9. Т. Корн, Г. Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984.
10. С.Н. Степанов. Основы телетрафика мультисервисных сетей. – М.: Эко-Трендз, 2010.
11. ITU-D. Teletraffic Engineering Handbook (edited by V.B. Iversen). – Geneva, 2003.
12. Л. Клейнрок. Вычислительные системы с очередями. – М.: Мир, 1979.
13. Г. Бейтмен, А. Эрдейи. Высшие трансцендентные функции. Функции Бесселя, функции параболического цилиндра, ортогональные многочлены. – М.: Наука, 1966.

Часто говорят, что цифры управляют миром;
по крайней мере, нет сомнения в том, что
цифры показывают, как он управляется.
(И. Гете)

Приложение 3. Структурные характеристики сети доступа

С помощью цифр доказать
можно все что угодно.
(Томас Карлейль)

П3.1. Оценка длины линий передачи

В этом разделе рассматривается несколько задач, касающихся оценок длины линий передачи в сетях доступа разной структуры. Интерес к этим задачам объясняется тем, что суммарная длина линий передачи существенно влияет на величину капитальных затрат, необходимых для построения и модернизации сетей доступа. Некоторые результаты, содержащиеся в этом разделе, справедливы для сетей других уровней иерархии системы электросвязи.

Для анализа длин линий передачи, образующих транспортную сеть, целесообразно использовать модель, содержащую четыре сетевых узла (СУ). Под СУ обычно понимается комплекс технических средств, который обеспечивает формирование и полупостоянную коммутацию каналов или трактов, используемых коммутируемыми сетями связи. Все функции тех СУ, которые используются в перспективных сетях доступа, определяются задачами, которые возложены на мультиплексор ввода/вывода (МВК). На рисунке П3.1 показаны основные варианты построения транспортной сети с четырьмя СУ. Подобные варианты реализованы в некоторых современных сетях доступа.

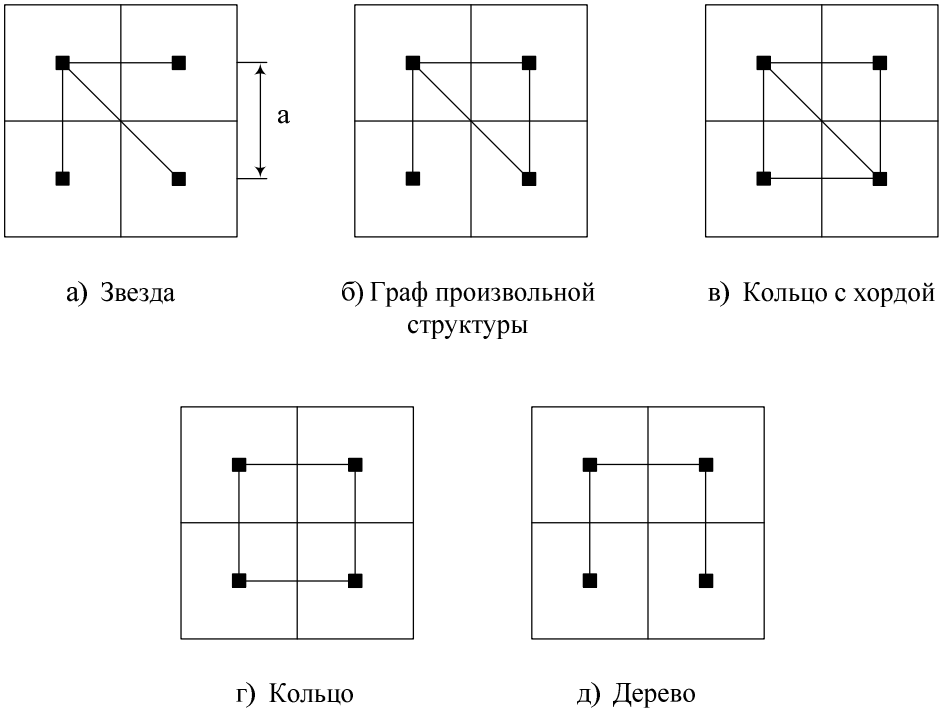


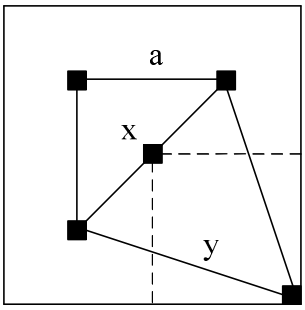
Рисунок П3.1. Транспортная сеть, содержащая четыре СУ

Структура "Звезда", вариант (а), часто используется на магистральном участке сети доступа. Для выбранной модели суммарная длина линий передачи – L_1 определяется очевидным соотношением: $L_1 = 2a + a\sqrt{2}$. Вариант (б) иллюстрирует граф произвольной структуры. Он отличен от варианта (а) тем, что добавлена одна линия. Применительно к существующей сети доступа она служит моделью линии межшкафной связи. Суммарная

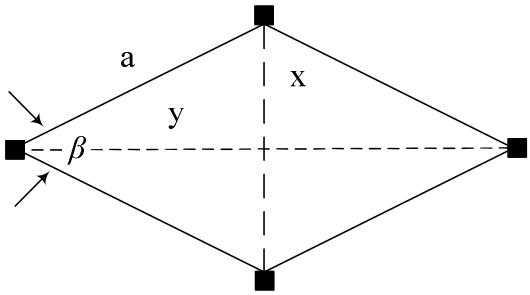
длина линий передачи – $L_2 = 3a + a\sqrt{2}$. Структура "кольцо с хордой", показанная как вариант (в), образуется в том случае, когда сеть доступа содержит линии межшкафной связи. Общая длина линий передачи – $L_3 = 4a + a\sqrt{2}$. Естественно, что для кольца, вариант (г), величина $L_4 = 4a$. Вариант (д) иллюстрирует топологию типа "Дерево". Для построения сети с такой структурой требуется минимальная суммарная длина линий передачи: $L_5 = 3a$.

Обратимся к оценкам суммарной длины линий передачи для сети, основанной на структуре "кольцо с хордой" – вариант (в) на рисунке П3.1. Места расположения вершин четырехугольника, для которых искомая величина будет минимальной и максимальной, показаны в левой части рисунка П3.2. Это значит, что суммарная длина линий передачи – L_6 определяется таким неравенством:

$$a(2+\sqrt{2}) \le L_6 \le 2a(1+\sqrt{2,5}). \qquad (П3.1)$$



а) Размещение СУ в любой точке нижнего правого фрагмента



б) Размещение всех СУ в вершинах ромба

Рисунок П3.2. Изменение структуры транспортной сети с четырьмя СУ

Приведенные элементарные геометрические соотношения позволяют сравнивать разные структуры транспортной сети по суммарной длине линий передачи. Однако использование правильных геометрических фигур в качестве модели пристанционного участка может привести к ошибкам при оценке разных вариантов. На рисунке П3.2 изображены две модели пристанционного участка. Вариант (а) подразумевает, что один СУ может размещаться в любой точке нижнего фрагмента, образующего квадрат с ребром a. Вариант (б) иллюстрирует ромбовидную форму пристанционного участка. Для обеих геометрических фигур введены дополнительные обозначения длин линий – x и y. Острый угол модели в виде ромба, вариант (б), обозначен буквой β.

В правой части рисунка П3.2 изображен ромб. Структура "кольцо с хордой" образуется за счет диагонали, длина которой – z выбирается из условия: $z = min\{x, y\}$. Для выбранного примера $z = x$. Искомая длина диагонали рассчитывается по теореме косинусов [1]:

$$z = a\sqrt{2(1-\cos\beta)}. \qquad (П3.2)$$

Суммарная длина линий передачи для сети "кольцо с хордой" – L_7 оценивается следующим соотношением:

$$L_7 = a[4+\sqrt{2(1-\cos\beta)}]. \qquad (П3.3)$$

На рисунке П3.3 приведены примеры моделей транспортной сети, состоящие из разного числа СУ. Все эти модели образуют правильные многоугольники.

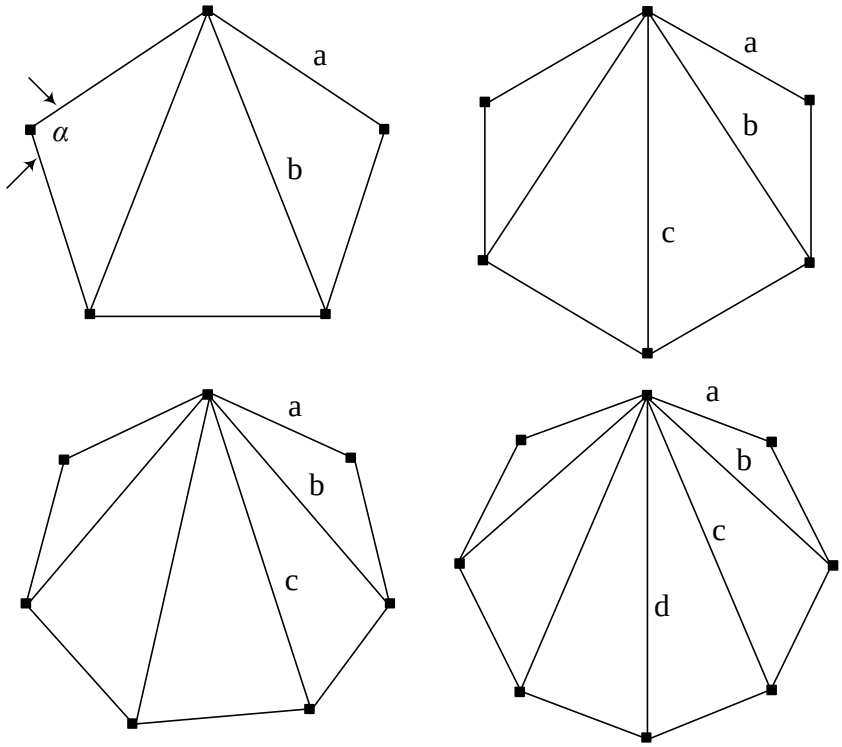


Рисунок П3.3. Модели транспортной сети с разным числом СУ

Угол α образован сторонами правильного многоугольника. Если число вершин правильного многоугольника равно N, то величина угла α (в радианах) вычисляется по такой формуле:

$$\alpha = \frac{2\pi(N-2)}{N}. \qquad \text{(П3.4)}$$

В таблице П3.1 для всех моделей, представленных на рисунке П3.3, приведены результаты расчета величин L_1 (звездообразная топология) и L_4 (кольцевая структура), а также относительного отклонения – δ. В трех нижних строках таблицы ($N = 7$, 8 и 9) выражения для расчета L_1 получаются очень громоздкими и не приводятся.

Таблица П3.1. Результаты расчета длин линий передачи

Число СУ	L_1	L_4	$\delta = \frac{L_1 - L_4}{L_1}$
3	$2a$	$3a$	–0,5000
4	$a(2+\sqrt{2})$	$4a$	–0,1716
5	$2a[1+\sqrt{2(1-\cos\alpha)}]$	$5a$	+0,0451
6	$2a(2+\sqrt{3})$	$6a$	+0,1962
7	$\approx 10,0980$	$7a$	+0,3068
8	$\approx 13,1369$	$8a$	+0,3910
9	$\approx 16,5808$	$9a$	+0,4572

Для фрагмента сети доступа, состоящего из пяти или более СУ, кольцевая топология обеспечивает экономию линейных сооружений. Этот факт хорошо иллюстрирует график, приведенный на рисунке П3.4.

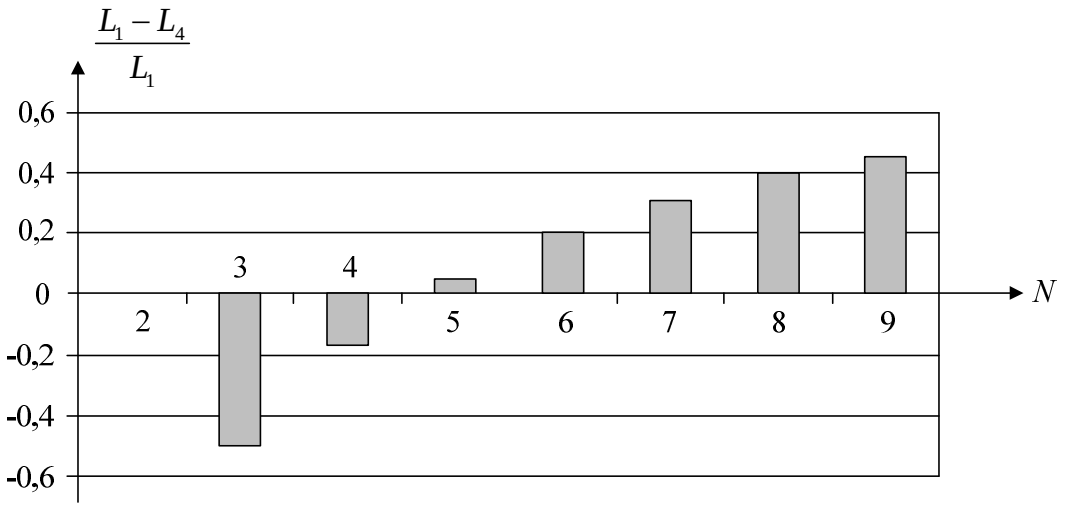


Рисунок П3.4. Изменение экономии длины линий передачи при росте числа СУ

Если стоимость аппаратно-программных средств СУ не зависит от структуры сети доступа (такое предположение во многих случаях считается справедливым), то можно говорить об экономии инвестиций Оператора, необходимых для реализации транспортных ресурсов. Это означает, что переход к кольцевым структурам на уровне магистрального участка сети доступа обеспечивает решение двух важных задач:

- повышение коэффициента готовности инфокоммуникационной системы в целом;
- снижение инвестиций, которые необходимы для модернизации эксплуатируемых линейных сооружений.

На рисунке П3.5 изображена структура транспортной сети, представляющая собой две концентрические окружности с радиусами R_1 и R_2. Каждое кольцо соединено с их общим центром, в котором расположен СУ0, двумя линиями передачи.

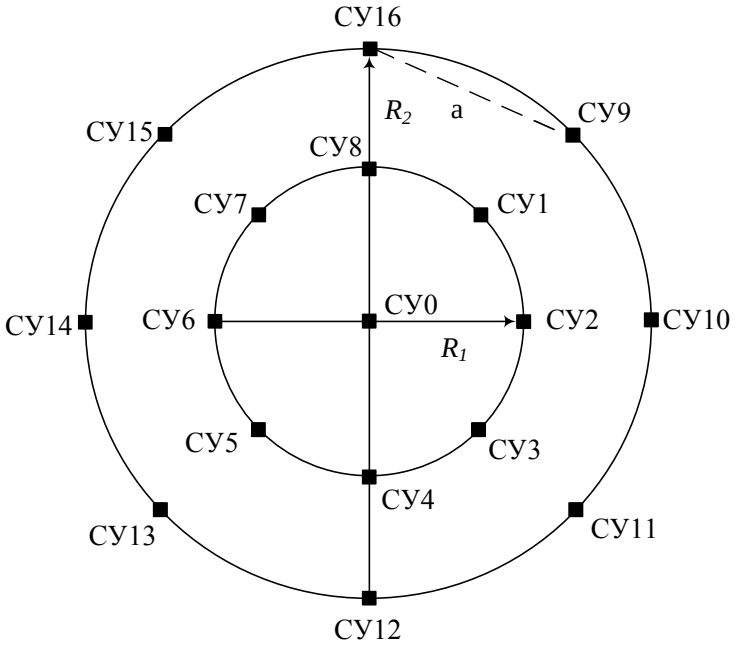


Рисунок П3.5. Структура транспортной сети, образованной двумя концентрическими окружностями

Суммарная длина линий передачи в сети такого вида – L_{KO} (КО – концентрические окружности) зависит только от величин R_1 и R_2. Она определяется следующим образом:

$$L_{KO} = 2R_1(1+\pi) + 2R_2(1+\pi) = 2(1+\pi)(R_1 + R_2). \qquad (П3.5)$$

На рисунке П3.5 между СУ9 и СУ16 внешнего кольца пунктирной линией показана сторона правильного вписанного многоугольника с длиной a. Число сторон правильного многоугольника определяется количеством СУ, которые расположены на окружности. Для правильного многоугольника, содержащего N вершин, величина a определяется по следующей формуле [1]:

$$a = 2R\sin\left(\frac{180^0}{N}\right). \qquad (П3.6)$$

Если смежные СУ соединяются прямыми линиями, то суммарная длина линий передачи – L^*_{KO} вычисляется иначе:

$$L^*_{KO} = 2R_1\left[1 + N_1\sin\left(\frac{180^0}{N_1}\right)\right] + 2R_2\left[1 + N_2\sin\left(\frac{180^0}{N_2}\right)\right]. \qquad (П3.7)$$

Очевидно, что при большом числе СУ различие между величинами L_{KO} и L^*_{KO} не будет существенным. Это утверждение иллюстрирует рисунок П3.6. Для его построения введены два предположения: $N = N_1 = N_2$ и $R_2 = 2R_1$.

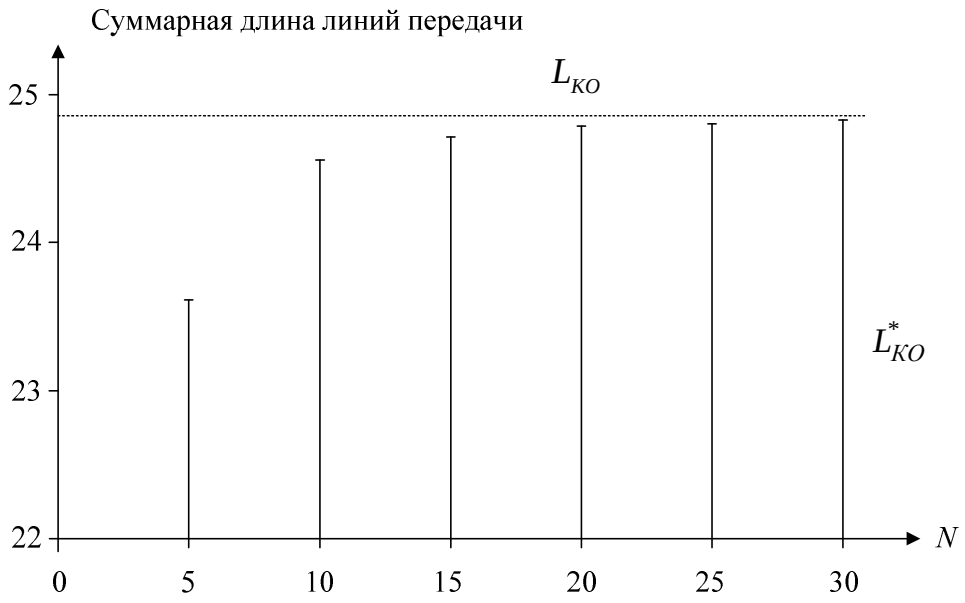


Рисунок П3.6. Влияние числа СУ на выбор модели транспортной сети

Принятые допущения не влияют на характер исследуемых процессов. Аналогичные зависимости можно получить для других соотношений численности СУ и радиусов описанных окружностей. Данный вывод следует из поведения функции $F(N)$, которая определяется как разность между величинами L_{KO} и L^*_{KO}:

$$F(N) = 2R_1\left(\pi - N_1\sin\frac{180^0}{N_1}\right) + 2R_2\left(\pi - N_2\sin\frac{180^0}{N_2}\right). \qquad (П3.8)$$

Функция $F(N)$ стремится к нулю при $N \to \infty$, так как справедливо следующее соотношение:

$$\lim_{N_j \to \infty} \left(N_j \sin \frac{180^0}{N_j} \right) = \pi. \qquad (П3.9)$$

Семнадцать СУ, изображенных на рисунке П3.5, можно объединить другим способом – за счет построения совокупности колец, которые проходят через СУ0. Этот узел служит центром транспортной сети доступа. Теоретически можно рассматривать и реализацию одного кольца. Тогда мы сталкиваемся с задачей коммивояжера [2]. Для модернизируемой сети доступа существенно то, что значительная часть потенциальных маршрутов коммивояжера будет отсутствовать. Этот факт объясняется невозможностью прокладки кабельной канализации в некоторых направлениях.

Кольцо для модели сети, показанной на рисунке П3.5, можно провести так, чтобы линии передачи прокладывались в основном по концентрическим окружностям. В этом случае суммарная длина линий передачи – L_{1K} будет меньше величины, определяемой по формуле (П3.5). Характерный пример структуры сети, состоящей из одного кольца, показан на рисунке П3.7. Перемычка между двумя концентрическими окружностями осуществляется за счет организации линии передачи между СУ8 и СУ16. Кольцо начинается на участке СУ0 – СУ1, а заканчивается линией передачи между СУ9 и СУ0.

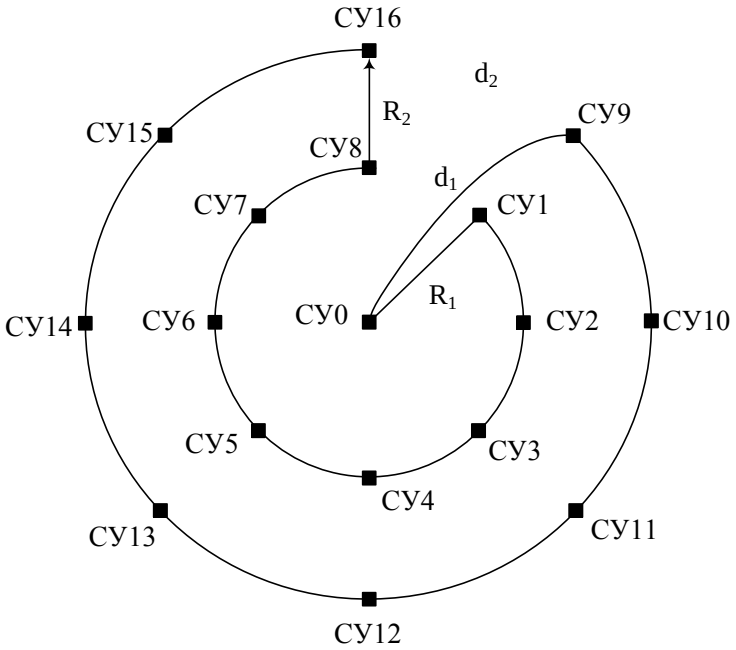


Рисунок П3.7. Структура транспортной сети, состоящей из одного кольца

Экономия длины линий передачи – ΔL, определяемая разностью величин L_{KO} и L^*_{KO}, вычисляется следующим образом:

$$\Delta L = 2R_1 + d_1 + d_2. \qquad (П3.10)$$

В этой формуле величины d_1 и d_2 определяют длины дуг внутреннего и внешнего кольца соответственно. Если места расположения СУ совпадают с точками размещения вершин правильного многоугольника, то длины дуг определяются по очевидной формуле:

$$d_j = \frac{2\pi R_j}{N_j}, \quad j = 1, 2. \qquad (П3.11)$$

Для больших значений N_j длины обеих дуг становятся малыми величинами. Тогда значение ΔL определяется, в основном, величиной радиуса R_1. Это означает, что переход

к структуре транспортной сети с одним кольцом дает экономию суммарной длины линий передачи, равную примерно удвоенной длине радиуса внутреннего кольца. В этом случае отношение ΔL к L_{KO} (относительная ошибка) может быть представлено в таком виде:

$$\frac{\Delta L}{L_{KO}} \approx \left[(1+\pi)\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)\right]^{-1}. \qquad (П3.12)$$

При отношении радиусов R_2 и R_1 как "2 к 1" величина относительной ошибки не превышает уровень в 10%, что вполне приемлемо для инженерных расчетов. Можно считать, что это отношение определяет потенциальную экономию суммарной длины линий передачи при переходе к однокольцевой топологии.

На рисунке П3.8 изображена другая структура транспортной сети, объединяющая те же семнадцать СУ, что показаны для модели с двумя концентрическими окружностями. Рассматриваемая модель состоит из четырех колец. Девятый и шестнадцатый СУ, как и три другие пары узлов, соединены линией передачи (дугой) длиной d. Иногда подобные структуры называют "ромашкой".

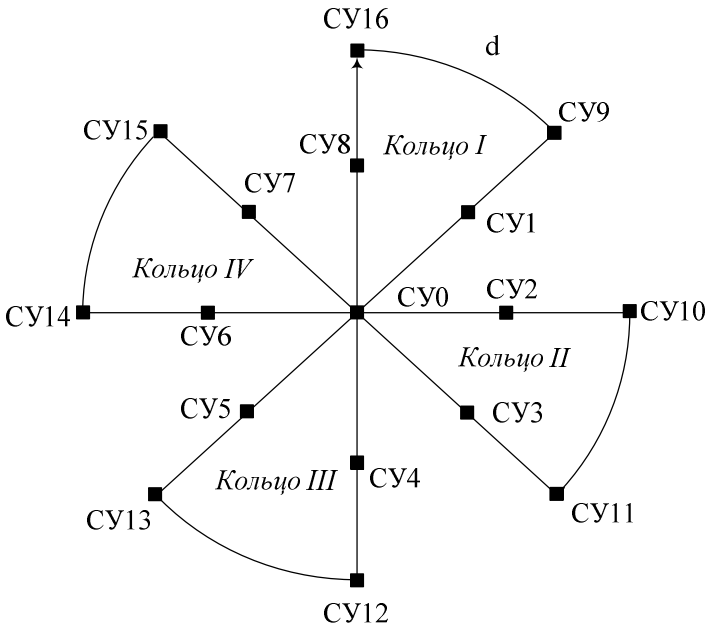


Рисунок П3.8. Структура транспортной сети, состоящей из четырех колец

Будем считать, что каждая пара СУ с номерами 1 и 9, 2 и 10, 3 и 11, 4 и 12, 5 и 13, 6 и 14 лежит на одной прямой. В этом случае суммарная длина линий передачи – L_{4K} не зависит от величины R_1. Она рассчитывается по следующей формуле:

$$L_{4K} = R_2(N+\pi). \qquad (П3.13)$$

В формуле (П3.13) нижний индекс при N (численность СУ в кольце) не поставлен. Это объясняется равенством численности СУ в обоих кольцах.

Практический интерес представляет сравнение двух структур транспортной сети, показанных на рисунках П3.5 и П3.8. Величина L_{KO} не зависит от N_j – числа СУ в любом из колец транспортной сети. Величина L_{4K} не зависит от R_1 – длины радиуса внутреннего кольца.

Обозначим отношение R_1 к R_2 через h. Очевидно, что $0 \le h \le 1$. Суммарная длина кабельных трасс в значительной мере определяет затраты на модернизацию сети доступа. Для варианта транспортной сети, показанного на рисунке П3.5, при произвольном числе

СУ – N (нулевой узел не учитывается) суммарная длина кабельных трасс будет меньше в следующем случае:

$$N > 4(1+\pi)(1+h) - 2\pi. \qquad (П3.14)$$

Максимальная длина внутреннего кольца для структуры транспортной сети, которая показана на рисунке П3.5, соответствует ситуации, когда значение h приближается к единице. Тогда неравенство (П3.14) трансформируется так:

$$N > 8 + 6\pi. \qquad (П3.15)$$

Если предположить, что $h = 0,5$, то рассматриваемое неравенство имеет следующий вид:

$$N > 6 + 4\pi. \qquad (П3.16)$$

Это значит, что структура с кольцами становится менее экономичной (по критерию минимума суммарной длины линий передачи) уже при девятнадцати СУ в каждой из двух окружностей. Обе оценки подтверждаются проектными решениями [3], которые были предложены китайскими специалистами.

Практический интерес для планирования сетей доступа представляет также влияние формы пристанционного участка на среднее расстояние $l^{(1)}$ между местами размещения коммутационной станции и потенциальных клиентов Оператора. Оценки этих расстояний для различных форм пристанционного участка приведены, например, в [4]. Значения $l^{(1)}$ как функции площади пристанционного участка – S приведены на рисунке П3.9. Вне зависимости от формы пристанционного участка величина S одинакова.

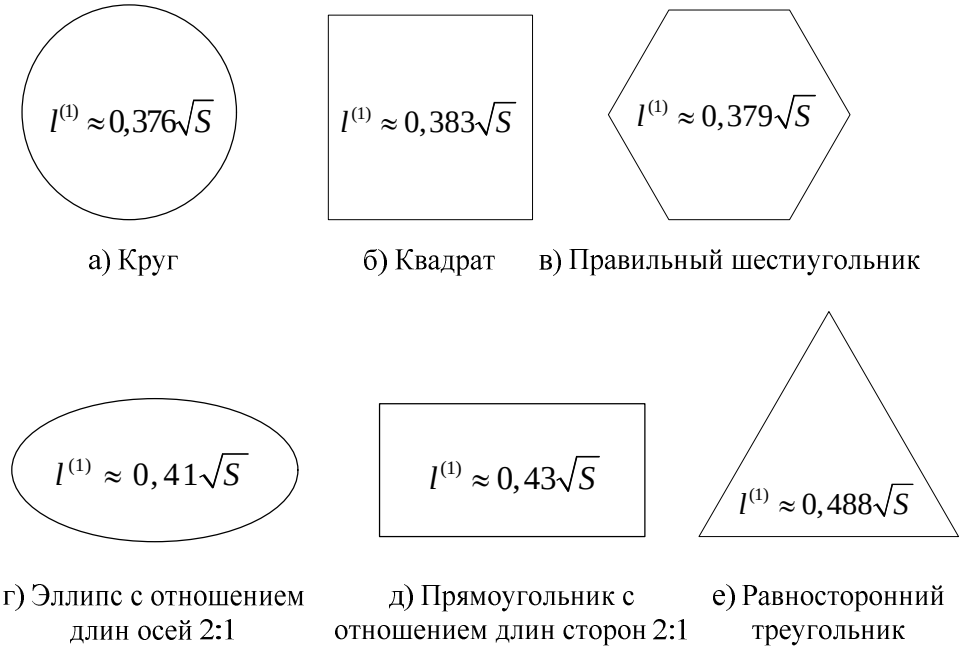


Рисунок П3.9. Математическое ожидание длины АЛ при различной форме пристанционного участка

Максимальная средняя длина АЛ свойственна модели пристанционного участка в виде равностороннего треугольника. Именно такая модель используется в проекте TITAN [5], посвященном исследованию перспективных сетей доступа.

Расстояния, указанные на рисунке П3.9, оценивались *"по прямой"*. Тот факт, что кабельная канализация строится вдоль улиц, не учитывался. В реальных проектах трассу между кроссом коммутационной станции и местом подключения абонентских устройств следует представить *ломаной линией*. Увеличение реальных длин кабельных трасс можно

учесть с помощью поправочных коэффициентов – g_j. В [4] приведены значения таких коэффициентов для пристанционного участка в виде прямоугольника с отношением длин его сторон – U_C.

Численные значения поправочных коэффициентов g_j для разных величин U_C приведены в таблице П3.2. Во второй строке таблицы приведена длина АЛ, измеренная вдоль трассы прокладки кабельной канализации – l_T. Коэффициент g_j равен результату деления величин, приведенных соответственно во второй и в третьей строках таблицы.

Таблица П3.2. Поправочные коэффициенты g_j для модели сети в виде прямоугольника

U_C	1	2	3	4	5	6	7
l_T	$0{,}5\sqrt{S}$	$0{,}53\sqrt{S}$	$0{,}58\sqrt{S}$	$0{,}62\sqrt{S}$	$0{,}67\sqrt{S}$	$0{,}71\sqrt{S}$	$0{,}75\sqrt{S}$
$\bar{l}$	$0{,}38\sqrt{S}$	$0{,}43\sqrt{S}$	$0{,}48\sqrt{S}$	$0{,}53\sqrt{S}$	$0{,}58\sqrt{S}$	$0{,}63\sqrt{S}$	$0{,}68\sqrt{S}$
g_j	1,3	1,22	1,2	1,18	1,15	1,13	1,1

Несложно получить численные значения поправочных коэффициентов g_j для ряда других форм пристанционного участка РАТС. Величины этих коэффициентов приведены в таблице П3.3. В последней строке данной таблицы указана величина поправочного коэффициента, полученная для одного реального пристанционного участка. В последнем столбце таблицы П3.3 содержится оценка возможных относительных ошибок – δ_j, обусловленная выбором формы пристанционного участка в виде геометрической фигуры правильной формы.

Таблица П3.3. Величины g_j и δ_j для четырех моделей сети доступа

Форма пристанционного участка	Коэффициент g_j	Ошибка δ_j
Квадрат	1,32	+3,9%
Равносторонний треугольник	1,12	– 11,8%
Круг	1,27	0
Реальный пристанционный участок	1,27	0

Тот факт, что коэффициенты g_j идентичны в двух нижних строках таблицы, следует считать случайным совпадением. Модель пристанционного участка в виде квадрата или круга считается наиболее удачной с точки зрения упрощения оценки средней длины АЛ. Полезные соотношения, которые касаются влияния формы пристанционного участка на характеристики транспортных сетей, приведены также в [6] и в [7].

Использование правильных многоугольников в качестве моделей транспортных сетей часто позволяет оценить верхнюю или нижнюю границы исследуемых функций. Известна задача поиска так называемого "кратчайшего дерева", для которого сумма длин ребер графа минимальна [8]. Для решения этой задачи необходимо найти координаты точки Штейнера, в которой сходятся все ребра графа, образуя "кратчайшее дерево".

На рисунке П3.10 показан равносторонний треугольник; для него точка Штейнера (Ш) определяется местом схождения ребер под углами 120^0. Длина каждой стороны треугольника равна a. Простейшие геометрические соотношения позволяют рассчитать длину ребра "кратчайшего дерева". Она составляет $a(\sqrt{3})^{-1}$. Следовательно, сумма длин трех ребер графа, образующего "кратчайшее дерево", равна $a\sqrt{3}$. Сумма длин ребер любого другого графа будет больше, чем $a\sqrt{3}$.

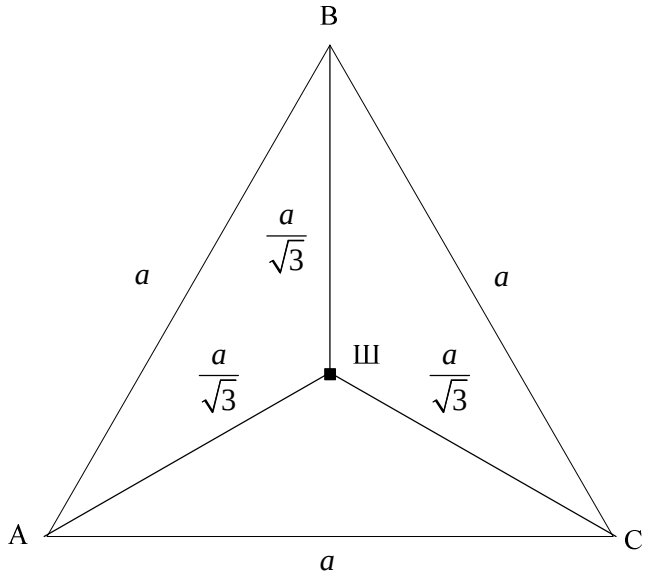


Рисунок П3.10. Точка Штейнера для модели сети в виде равностороннего треугольника

Анализ простейших моделей сетей доступа позволяет получить ряд интересных и практически значимых результатов. Перспективная сеть доступа, как правило, будет состоять из значительного числа выносных модулей (ВМ). Граф, который описывает подобную сеть, обычно содержит более десяти вершин. Задача синтеза оптимальной структуры такого графа относится к классу *NP-сложных* [9]. В некоторых публикациях ее также называют *NP-полной* задачей (*Nondeterministic Polynomial Complete Problem*). Такие задачи не могут быть решены за полиномиальное время.

С другой стороны, задачу выбора оптимальной структуры для перспективной сети доступа можно упростить, если учесть ряд ограничений, обусловленных свойствами эксплуатируемой инфокоммуникационной системы. Например, для первой модели сети доступа, показанной на рисунке П3.11, можно ограничить то множество вариантов связи между выносными модулями (вершинами графа), которое необходимо рассматривать в процессе решения NP-сложной задачи.

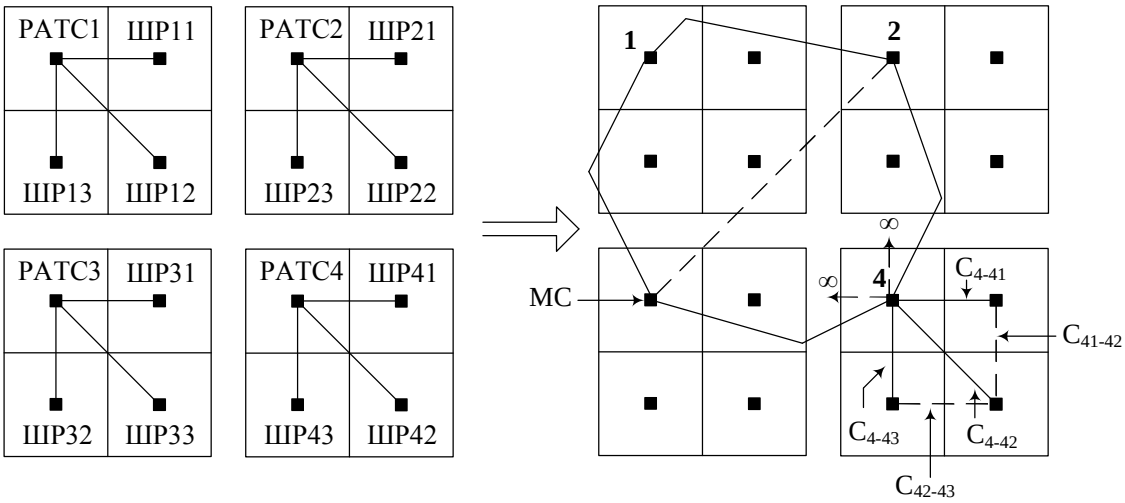


Рисунок П3.11. Первая модель сети доступа

Рассматриваемая модель иллюстрирует характерный сценарий модернизации ГТС: четыре аналоговых РАТС заменяются одной цифровой МС. В результате сеть становится нерайонированной [10]. Предполагается, что новая цифровая МС будет установлена в том помещении, в котором ранее располагалась демонтируемая РАТС3.

В левой части рисунка П3.11 показаны четыре идентичных пристанционных участка. Четыре РАТС связаны между собой по принципу "каждая с каждой" (соответствующие пучки СЛ на рисунке не показаны). В зоне обслуживания каждой РАТС установлены три ШР. Линии межшкафной связи в составе эксплуатируемых сетей доступа отсутствуют.

Задача выбора оптимальной структуры сети доступа может быть сформулирована следующим образом:

- для каждого $m-го$ ВМ заданы пропускная способность линии передачи (B_m) и коэффициент готовности для связи с МС (A_m);
- для любой пары ВМ определена стоимость организации линии передачи – C_{ij}, имеющей пропускную способность B_{ij};
- необходимо найти такую структуру сети доступа, чтобы при соблюдении ограничений на величины B_m и A_m обеспечивался минимум затрат Оператора.

Очевидно, что для рассматриваемого примера – правый фрагмент рисунка П3.11 – речь идет о связи МС с пятнадцатью выносными модулями. Число возможных вариантов решения задачи весьма велико. Однако некоторые величины C_{ij} можно положить равным бесконечности. На практике это означает, что создание линии передачи между модулями i и j не представляется возможным. Сложность решения оптимизационной задачи будет в значительной мере определяться численностью равенств вида $C_{ij} = \infty$.

Все РАТС были связаны между собой по принципу "каждая с каждой". Поэтому между местом размещения цифровой МС и тремя площадками, где ранее располагались три РАТС, может быть организовано кольцо – правый фрагмент на рисунке П3.11. Более того, при необходимости повышения надежности инфокоммуникационной системы в этом кольце может быть реализована хорда. Она показана пунктирной линией.

Рассмотрим зону обслуживания четвертого ВМ. Ранее терминалы, расположенные на этой территории, были включены в РАТС4. Очевидно, что линии передачи могут быть экономично организованы там, где уже построена канализация и проложены кабели связи. Направления такого рода на рисунке П3.11 обозначены символами C_{4-41}, C_{4-42} и C_{4-43}. Соответствующие трассы не позволяют организовать кольцо или иную структуру, обеспечивающую высокую надежность транспортных ресурсов. Для формирования кольца можно создать линии передачи на участках C_{41-42} и C_{42-43}, если соответствующие затраты Оператора будут находиться в разумных пределах. Иначе единственным решением остается организация "плоских колец", которые не обеспечивают надежность транспортной сети при обрывах кабелей связи. "Плоское кольцо" позволяет избежать отрицательных последствий отказов в оборудовании транспортной сети.

Для четвертого ВМ показаны две стрелки, идущие наверх и влево. Для обеих стрелок указан символ "∞". Это означает, что стоимость организации любых новых линий передачи очень велика и практически подобные решения не реализуемы. Тогда поставленная задача для четвертого ВМ заметно упрощается. Если такая ситуация характерна для всех остальных ВМ, то поставленная выше задача становится предельно простой. Необходимо найти оптимальные решения для четырех территорий, а также для кольца, которое объединяет МС и площадки, где ранее располагались три демонтируемые РАТС. Такие задачи могут быть решены перебором всех возможных вариантов структуры транспортной сети.

Формируемая структура сети доступа обладает рядом недостатков, среди которых следует выделить низкую надежность на участке между оборудованием в помещении пользователя и кольцом, проходящим через площадки, где размещались демонтируемые РАТС. Эта особенность рассматриваемой структуры анализируется в следующем разделе данного Приложения.

На рисунке П3.12 показана структура перспективной сети доступа, иллюстрирующая другое решение. Оно основано на гипотезе о возможности создания нескольких новых

трасс кабельной канализации. Эти трассы показаны на рисунке П3.12 (левый фрагмент) пунктирными линиями.

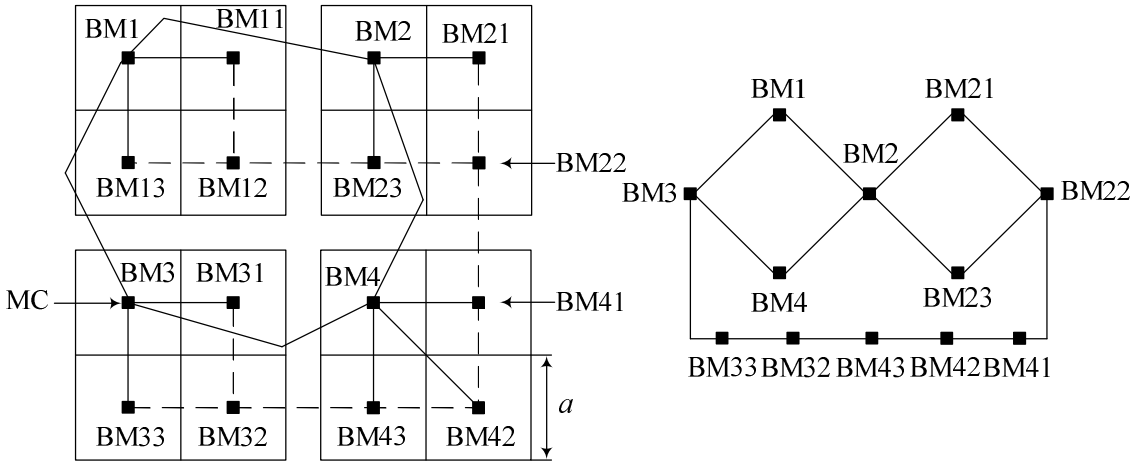


Рисунок П3.12. Вторая модель сети доступа

Организация новых кабельных трасс в сети доступа позволяет существенно повысить коэффициент готовности для всех ВМ. В правой части рисунка П3.12 показана структура, позволяющая оценить две важные характеристики рассматриваемой модели сети доступа:

- общую длину кабельных линий, используемых для построения транспортной сети;
- коэффициент готовности фрагмента сети доступа между МС и каждым ВМ.

При построении графа предполагалось, что хорды в каждом кольце отсутствуют. Кроме того, между ВМ3 и ВМ22 показан только один альтернативный маршрут – нижняя ветвь графа. Такой подход, существенно упрощая модель, позволяет оценить нижнюю границу коэффициента готовности.

Аспектам надежности посвящен следующий раздел. Поэтому далее акцентируется внимание на оценке суммарной длины используемых кабельных линий. Будем считать, что каждый ВМ обслуживает территорию, имеющую форму квадрата. Длина стороны этого квадрата равна a. Каждый ВМ расположен в центре квадрата. Пристанционный участок состоит из шестнадцати квадратов, образуя территорию площадью $16a^2$. Если каждая кабельная трасса организована "по прямой", то суммарная длина линий передачи – L_2 составит $19a$.

Вернемся к рисунку П3.11. Для объединения четырех пристанционных участков (без обеспечения надежности транспортной сети) необходимо использовать три кабельные трассы. Это означает, что суммарная длина линий передачи – L_1 может быть рассчитана так:

$$L_1 = a(11+3\sqrt{2}) \approx 15,24a. \qquad (П3.17)$$

Разница между величинами L_2 и L_1 составляет $3,76a$. Ее следует рассматривать как "стоимость" повышения надежности сети доступа. При увеличении численности ВМ в границах пристанционного участка каждой из демонтируемых РАТС разница между величинами L_2 и L_1 становится менее 25%. Для реальных сетей доступа число ВМ, как правило, будет более четырех. Это означает, что существенное повышение надежности сетей доступа может обеспечиваться ростом суммарной длины линейных сооружений менее чем на 25%.

Большинство оценок длины линий передачи, приведенных в этом разделе, основано на геометрических моделях, выбираемых из множества правильных многоугольников. Реальные пристанционные участки могут иметь форму, весьма далекую от правильного

многоугольника. Пример такой формы пристанционного участка приведен на рисунке П3.13.

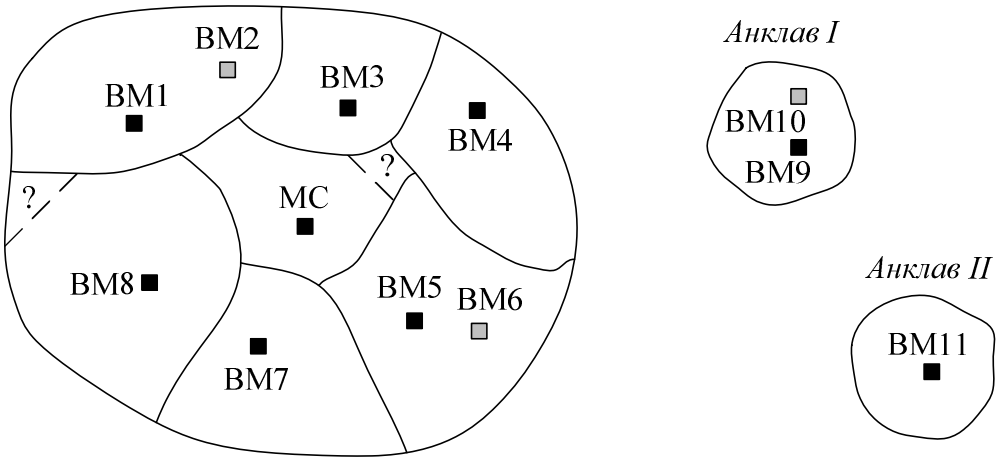


Рисунок П3.13. Модель пристанционного участка произвольной формы

Ряд оценок, полученных при анализе моделей, которые основаны на правильных многоугольниках, позволяет получить важные для практики выводы. Тем не менее, существует несколько видов задач, для решения которых приходится использовать более сложные модели. Первая задача связана с возможным наличием анклавов, в которых расположены обслуживаемые абоненты. На рисунке П3.13 изображены два таких анклава. Их появление может быть обусловлено рядом причин. Обычно анклавы формируются в двух случаях:

- некоторые группы абонентов нельзя включить в ближайшую цифровую МС из-за невозможности или нецелесообразности расширения ее емкости;
- абонентам, расположенным на территории анклавов, необходимо обеспечить инфокоммуникационные услуги, которые не поддерживаются коммутационной станцией, расположенной рядом.

Вторая задача возникает вследствие того, что некоторым ВМ присущи особенности, существенно влияющие на планирование сети доступа. На рисунке П3.13 три таких ВМ окрашены светлее, чем остальные. Восемь ВМ с номерами 1, 3, 4, 5, 7, 8, 9 и 11 представляют собой выносные концентраторы, подключаемые к МС. Три других ВМ (второй, шестой и десятый) могут выполнять другие функции. Простейший случай – каждый из трех ВМ выполняет функции УАТС. Тогда необходимо найти рациональный способ включения УАТС в кольцо. Характерным примером более сложной ситуации можно считать обеспечение транспортными ресурсами системы КТВ. Возникающие в подобных случаях проблемы можно представить тремя следующими примерами:

- для КТВ могут понадобиться очень большие транспортные ресурсы, что требует пересмотра методики расчета пропускной способности для линий передачи;
- принципы управления доступными транспортными ресурсами, как правило, отличаются от методов, принятых в телефонии;
- показатели качества обслуживания могут быть диверсифицированы для разных видов услуг.

Третья задача связана с двумя фрагментами пристанционного участка, отмеченными знаком "?". Допустим, что знаки "?" указывают на зоны новой застройки, для которых через некоторое время потребуется установка выносных концентраторов, то есть еще двух ВМ.

На рисунке П3.14 показана возможная структура транспортной сети доступа для рассматриваемой модели. Предполагается, что оба анклава подключаются к МС через транспортную сеть, используемую для организации межстанционных линий передачи. Только один ВМ (тринадцатый) из двух, установка которых потребуется в перспективе, заранее включается в сеть доступа.

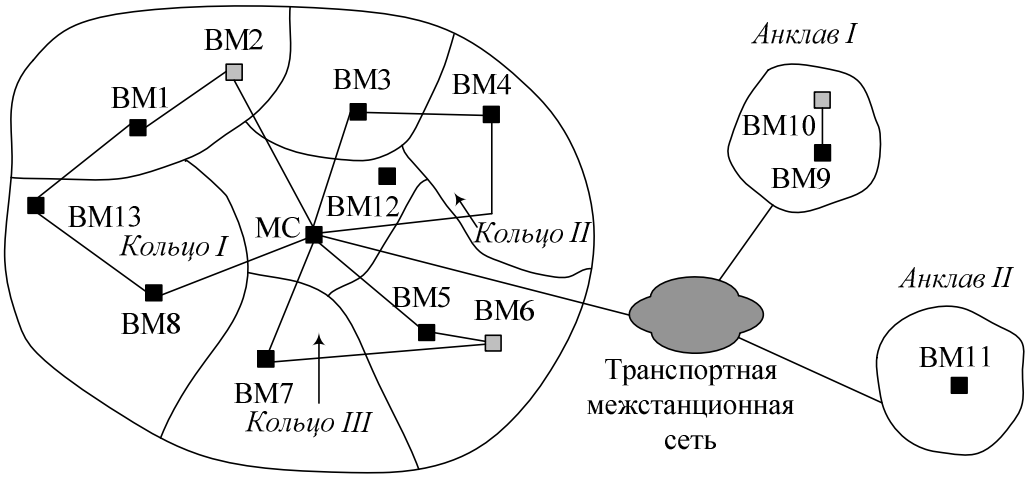


Рисунок П3.14. Модель сети доступа для пристанционного участка произвольной формы

С точки зрения вопросов, рассматриваемых в этом разделе, существенны следующие особенности модели сети доступа:

- достоверность оценок, полученных при помощи моделей в виде правильных геометрических фигур, для реальных сетей доступа;
- правила включения новых ВМ в эксплуатируемые кольца и соответствующее изменение структуры сети доступа.

В период массового внедрения декадно-шаговых и координатных АТС сети доступа представляли собой совокупность АЛ. Никакие ВМ, кроме УАТС, не использовались. Связь между УАТС и РАТС организовывалась по физическим цепям. Для таких сетей доступа аспекты достоверности оценок, полученных при помощи моделей в виде правильных геометрических фигур, рассмотрены в [4]. Для перспективных сетей доступа оценки, полученные в [4], целесообразно дополнить результатами, которые отражают новые принципы организации транспортных ресурсов. С этой точки зрения существенны два момента:

- влияние смещения места расположения ВМ относительно той точки, для которой затраты на организацию связи с МС определены как минимальные;
- влияние смещения места расположения ВМ относительно той точки, для которой будут минимальными затраты на подключение терминалов по физическим цепям.

В левой части рисунка П3.15 показан пристанционный участок, модель которого была введена ранее. Выделено одно направление транспортной сети: линия передачи между МС и ВМ7 длиной L_1. Предполагается, что оборудование этого ВМ расположено не в той точке, которая должна быть выбрана для минимизации затрат на построение сети доступа. Теоретически следовало выбрать точку ВМ7_{opt}, расстояние от которой до МС оставляет L_2. В правой части рисунка П3.15 показан увеличенный фрагмент сети доступа. Для некоторой точки X показаны длины АЛ до ВМ7 и ВМ7_{opt} – l_1 и l_2 соответственно. Расстояние между двумя ВМ обозначено через h. Можно считать, что это расстояние меньше r – радиуса той окружности, внутри которой находятся все возможные места расположения ВМ7.

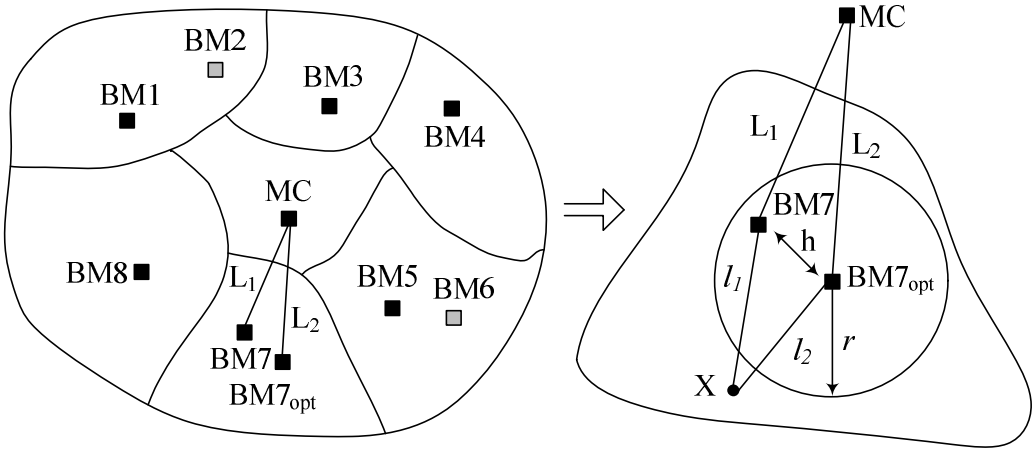


Рисунок П3.15. Фрагмент модели сети доступа для пристанционного участка произвольной формы

Центр окружности – точка размещения $BM7_{opt}$. Очевидно, что максимумы величин L_1 и l_1 определяются следующим образом:

$$max\{L_1\} = L_2 + r, \quad max\{l_1\} = l_2 + r. \qquad (П3.18)$$

Можно считать, что случайная величина h равномерно распределена на отрезке $[0, r]$. Это означает, что среднее значение возможного увеличения длин L_1 и l_1 равно $0,5r$. Для трассы L_1 изменение длины в разумных пределах не приводит к заметному росту стоимости сети доступа. Речь идет об одной линии передачи с высокой пропускной способностью. Обозначим стоимость ее создания C_L. Иная ситуация складывается с ростом длин l_1. Этот фрагмент сети доступа состоит из множества физических цепей, которое измеряется сотнями и даже тысячами линий. Стоимость построения этого фрагмента сети доступа – $C_{\{l\}}$ весьма высока. Можно утверждать, что справедливо такое неравенство:

$$C_{\{l\}} >> C_L. \qquad (П3.19)$$

В [11] рассматривается влияние смещения коммутационной станции относительно места своего оптимального размещения на среднее значение длины АЛ. Геометрические модели сети доступа, в центре которой расположена коммутационная станция, и ее фрагмента, содержащего один ВМ, идентичны. Поэтому для поставленной задачи можно использовать результаты, приведенные в [4, 11].

Заменим произвольную форму фрагмента сети доступа, изображенную в правой части рисунка П3.15, кругом с радиусом R. Максимальные изменения длины физических цепей будут наблюдаться при условии, что $R = r$. В таблице П3.4 приведены данные об изменении величины l_1 при разных отклонениях места расположения ВМ от своего геометрического центра.

Таблица П3.4. Изменение величины l_1 при разных вариантах размещения ВМ

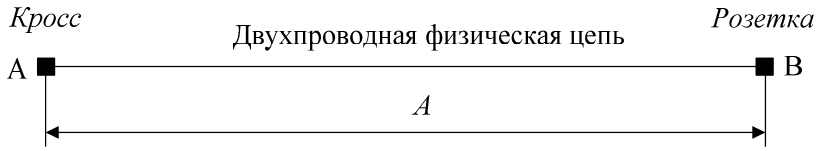
Отношение $\frac{r}{R}$	Среднее значение l_1	Относительный рост величины l_1, %
0	0,67 R	0
0,25	0,78 R	16,4
0,5	0,88 R	31,3
1,0	1,13 R	68,7

Анализ ряда конкретных проектов построения сетей доступа показывает, что в большинстве случаев смещение коммутационных станций и выносных модулей (отношение r к R) находится в диапазоне от 15% до 45%. Следовательно, увеличение средней длины физической цепи не превышает 30%. Длина физической цепи прямо пропорциональна ее стоимости. Поэтому необходимо стремиться к тому, чтобы все ВМ размещались как можно ближе к геометрическому центру обслуживаемого фрагмента сети доступа. Этим геометрическим центром становится точка, для которой суммарная длина подключаемых физических цепей минимальна.

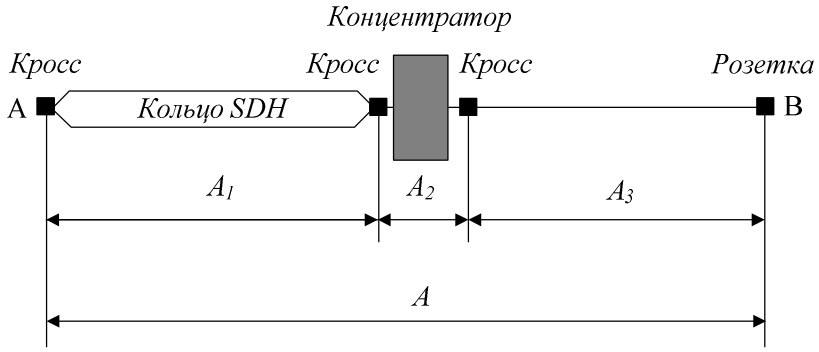
Самыми стойкими оказываются такие технические структуры, которые в чем-то, подражают живым организмам.
(Мераб Мамардашвили)

П3.2. Оценка надежности сети доступа

Для оценки надежности сети доступа необходимо выбрать модель, которая будет адекватно отражать исследуемые характеристики. Для простейшего варианта построения сети доступа – вариант (а) на рисунке П3.16 – выбор такой модели несложен.



а) Простейший вариант построения сети доступа



б) Построение сети доступа с выносными модулями и с кольцевой топологией на магистральном участке

Рисунок П3.16. Два варианта построения сети доступа

Иная ситуация складывается при выборе модели для сети доступа, построенной с выносными модулями и с применением кольцевой топологии на магистральном участке – вариант (б) на том же рисунке. В качестве выносного модуля на рисунке П3.16 показан концентратор. Для варианта (а) коэффициент готовности между кроссом, в котором транспортные ресурсы предоставляются коммутируемой сети, и розеткой, служащей для подключения терминала, определяется, в основном, характеристиками двухпроводной физической цепи. Он будет зависеть от длины этой цепи, состояния жил и изоляции кабеля, а также от других факторов, но численная оценка величины A не представляется сложной.

Вариант (б) требует анализа коэффициентов готовности трех элементов в составе сети доступа. Только два элемента из трех относятся к транспортной сети:

- участок между кроссами, организованный, например, за счет кольца SDH;
- участок между кроссом концентратора и розеткой.

Кросс, который устанавливается в составе концентратора, условно разнесен на две части, что допустимо для расчета коэффициента готовности. Если оценивать коэффициент готовности для сети доступа без декомпозиции инфокоммуникационной системы, то можно использовать такое соотношение:

$$A = A_1 A_2 A_3. \qquad (П3.20)$$

Эта формула верна, если процессы отказов и восстановлений на всех трех участках сети доступа взаимно независимы. В этом разделе рассматриваются аспекты надежности транспортной сети, то есть надежность концентратора, как элемента коммутируемой сети, не должна учитываться. Тогда для оценки коэффициента готовности справедлива такая формула:

$$A = A_1 A_3. \qquad (П3.21)$$

Подобный подход позволяет провести некоторые обобщения. Для этого рассмотрим рисунок П3.17, который связан с моделью гипотетической сети в виде совокупности компонентов двух видов. Компоненты первого вида относятся к транспортной сети, а второго – к коммутируемой. Если величина коэффициента готовности для сети в целом рассчитывается по формуле, подобной выражению (П3.20), то можно сгруппировать сомножители так, как показано в нижней части рисунка П3.17. Сначала выстраиваются все K компонентов транспортной сети. За ними идут L компонентов коммутируемой сети. В верхней части рисунка показаны два компонента коммутируемой сети, следующие друг за другом. Такая модель может оказаться полезной для оценки надежности сложных систем распределения информации. В принципе, допускаются неравенства обоих видов: $K \geq L$ и $K \leq L$.

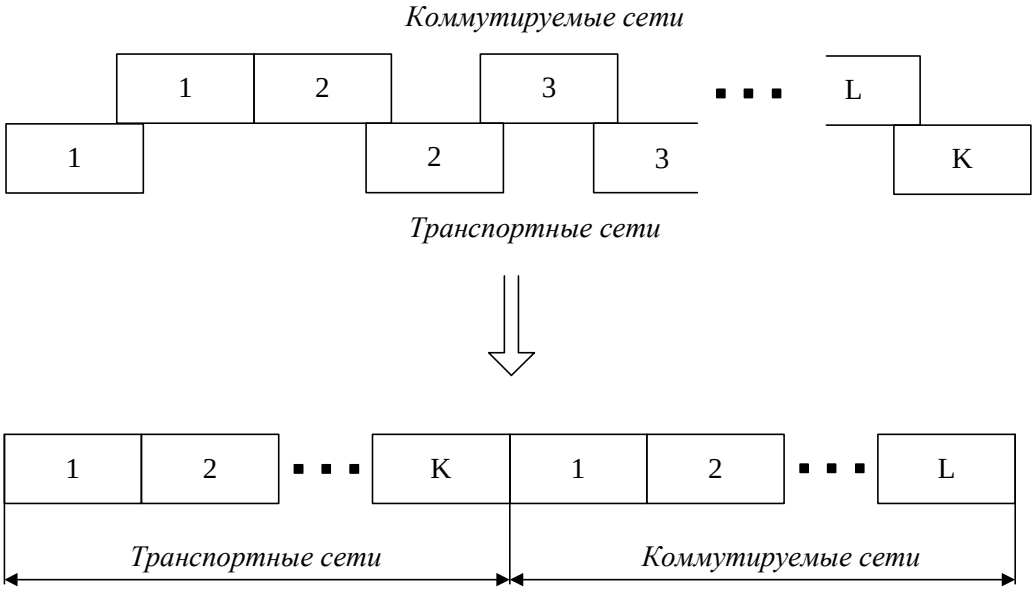


Рисунок П3.17. Модель гипотетической сети из компонентов двух видов

Можно, не изменяя модель, считать, что коэффициенты готовности всех элементов коммутируемых сетей равны единице. Это не мешает учесть коэффициент готовности оборудования распределения и обработки информации при исследовании надежности коммутируемых сетей. Следует подчеркнуть, что предложенный подход приемлем только для определенного круга задач, касающихся анализа характеристик надежности.

Практический интерес представляет оценка надежности сети доступа, построенной в соответствии с принципами, которые представлены вариантом (б) на рисунке П3.16. Модель сети, которая позволяет оценить коэффициент готовности – A, показана на рисунке П3.18. Между кольцом и оборудованием в помещении пользователя показаны два участка

сети доступа, в которых не предусмотрены средства резервирования. Вероятность работоспособности $i-го$ участка сети доступа равна p_i.

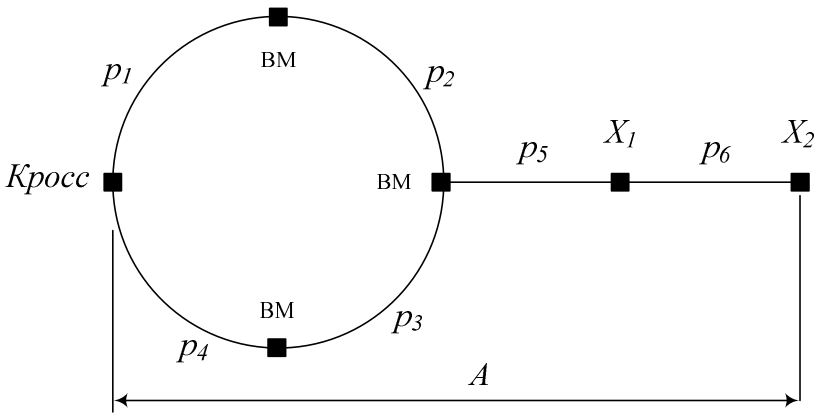


Рисунок П3.18. Модель для оценки надежности сети доступа

Границы этих участков с правой стороны обозначены точками X_1 и X_2. Точка X_2 совпадает с местом установки розетки. Коэффициент готовности может быть вычислен на основании принципов оценки вероятности связности для двухполюсной сети [8, 12]. Для модели, изображенной на рисунке П3.18, величина A определяется так:

$$A=[1-(1-p_1p_2)(1-p_3p_4)]p_5p_6. \qquad (П3.22)$$

Для получения простейших оценок обычно предполагают, что все вероятности p_i, входящие в формулу (П3.22), равны. Тогда, опуская все подстрочные индексы, можно упростить формулу для расчета величины A:

$$A=[1-(1-p^2)^2]p^2. \qquad (П3.23)$$

В таблице П3.5 приведены результаты расчета вероятности A при разных значениях величины p. Выражение в квадратных скобках названо в таблице первым сомножителем, а значение p^2 – вторым.

Таблица П3.5. Оценки коэффициента готовности для исследуемой модели сети доступа

Значение p	Первый сомножитель	Второй сомножитель	Величина A
0,99	0,9996	0,98010	0,97971187
0,999	0,999996	0,99800	0,99799701
0,9999	0,99999996	0,99980	0,99979997
0,99999	0,9999999996	0,99998	0,9999799

Очевидно, что $A<p^2$. Первый сомножитель с ростом p быстро приближается к единице. Это позволяет определить требование к надежности участка сети доступа:

$$p\approx\sqrt{A}. \qquad (П3.24)$$

Если после кольца расположено n точек X_j, то формула (П3.24) трансформируется следующим образом:

$$p\approx\sqrt[n]{A}. \qquad (П3.25)$$

Для реально достижимых величин p и возрастающих требований к надежности сети доступа (как и инфокоммуникационной системы в целом) использование линий передачи без резервирования порождает серьезные проблемы. Надежность уже стала одним из важ-

нейших показателей конкурентоспособности Оператора электросвязи. Ряд показателей надежности включаются в соглашения SLA [13].

Коэффициент готовности – только один из показателей надежности сети. Не менее важным показателем считается время восстановления отказа. Если, например, на участках сети доступа, которым на рисунке П3.18 приписаны вероятности p_5 и p_6, произойдет обрыв многопарного кабеля, то длительность восстановления связи будет значительной. Обеспечить приемлемое время восстановления после обрыва кабеля можно только при наличии независимого (с точки зрения надежности) пути обмена информацией. Для эксплуатируемых ныне сетей доступа такое решение может быть реализовано за счет использования беспроводных технических средств [14]. Данный способ обеспечения надежности в сети доступа рассматривается во второй главе монографии.

Рассмотрим структуры сети доступа, приведенные в предыдущем разделе (рисунки П3.7 и П3.8), с точки зрения обеспечиваемой надежности, которая выражается через коэффициент готовности. Практический интерес представляет надежность связи на участке между произвольным СУ и СУ0 – точкой, в которой транспортные ресурсы передаются в коммутируемые сети. На обоих рисунках изображены кольцевые структуры, различающиеся численностью СУ. На рисунке П3.19 показан граф, который содержит n вершин, объединенных в кольцо.

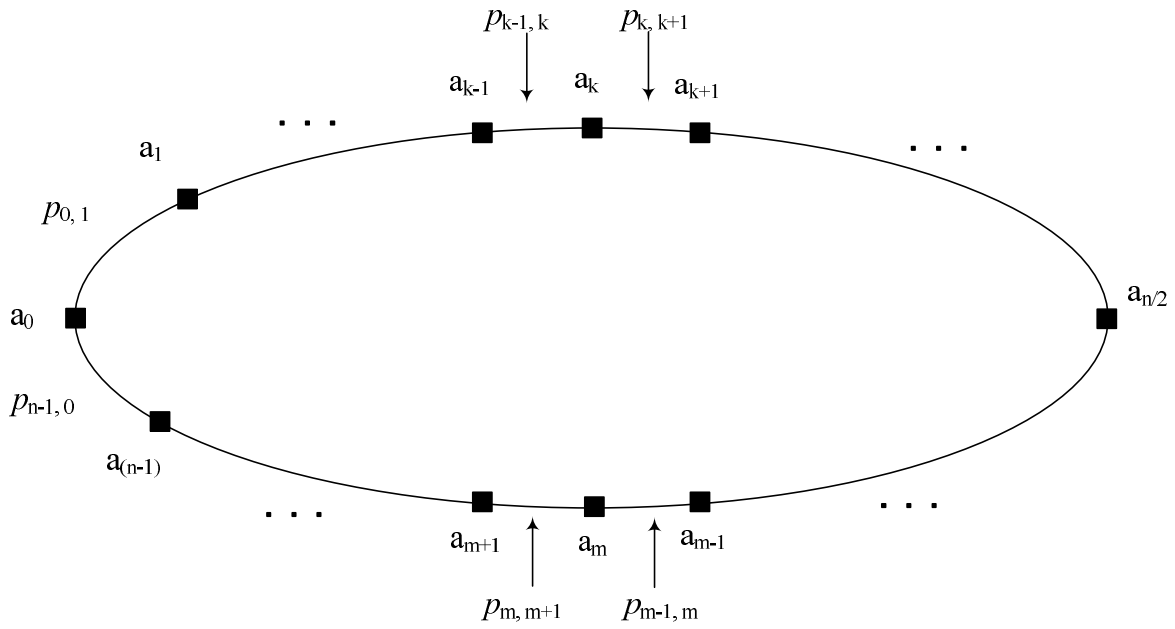


Рисунок П3.19. Модель графа с N вершинами

Для этого графа необходимо найти вероятность связи между вершинами a_0 и a_k. Коэффициент готовности между всеми смежными парами вершин задан вероятностями $p_{m,m+1}$. Вероятность связи между вершинами a_0 и a_k – A_k определяется следующим образом:

$$A_k = 1 - \left[1 - \prod_{i=0}^{k-1} p_{i,i+1}\right]\left[1 - \prod_{h=k}^{n-1} p_{h,h+1}\right]. \qquad (П3.26)$$

Если вероятность работоспособности всех ребер графа одинакова и равна p, то выражение для расчета A_k становится существенно проще:

$$A_k = 1 - \left(1 - p^k\right)\left(1 - p^{n-k}\right). \qquad (П3.27)$$

Несложно убедиться, что при любых значениях p коэффициент готовности будет минимален для одной вершины графа, если n – четное число. Номер этой вершины – a определяется следующим образом:

$$a = \frac{n}{2}. \qquad (П3.28)$$

Если n – нечетное число, то коэффициент готовности будет минимален для двух вершин графа, номера которых (b и c) рассчитываются так:

$$b = \frac{n-1}{2}, \quad c = \frac{n+1}{2}. \qquad (П3.29)$$

На рисунке П3.20 показана зависимость величины коэффициента готовности для разного номера (расположения) вершины в графе. Для расчетов A_k выбран граф с одиннадцатью вершинами. Величина p составляет 0,999.

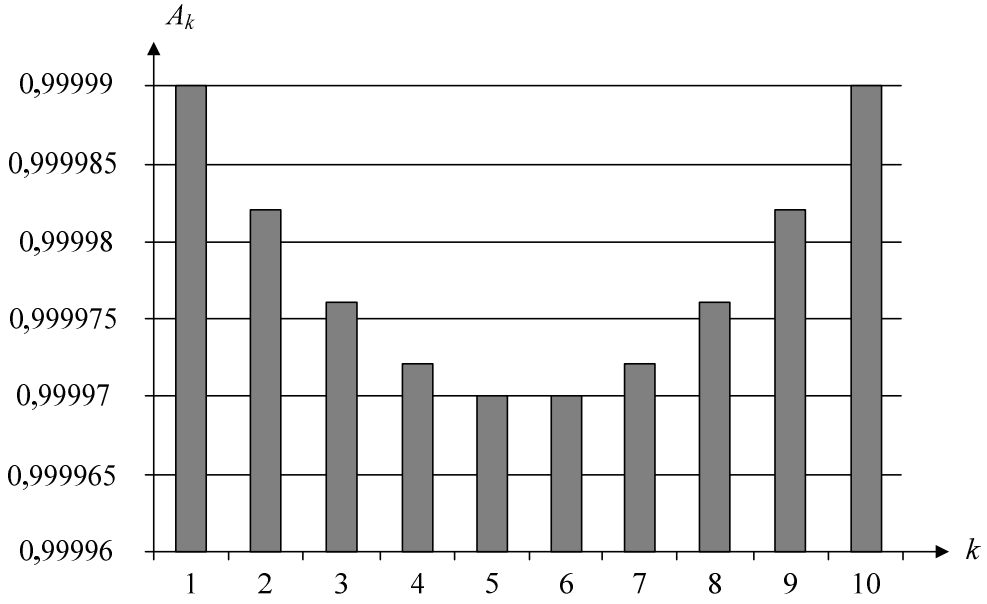


Рисунок П3.20. Зависимость коэффициента готовности от номера вершины

Повышение надежности может осуществляться за счет организации хорды в кольце. Для рассматриваемого примера хорду целесообразно организовать между вершинами с номерами "0" и "5" или "6". Для графа с четным числом вершин решение этой задачи осуществляется на основании соотношений (П3.29).

Для структуры транспортной сети, показанной на рисунке П3.7, суммарная длина линий передачи не зависит от числа включенных СУ. Это преимущество рассматриваемой структуры не представляется существенным из-за снижения коэффициента готовности. В частности, кольцо, изображенное на рисунке П3.7, содержит семнадцать СУ. Очевидно, для обеспечения показателей надежности, установленных для сети доступа, придется организовывать хорды, количество которых будет расти по мере увеличения численности подключенных СУ.

С практической точки зрения этот вывод ставит под сомнение эффективность структуры транспортной сети в виде двух концентрических окружностей. Тем не менее, такое решение широко используется китайскими специалистами в процессе развития национальной ТФОП. Очевидно, структура с двумя концентрическими окружностями может стать эффективной при выполнении, как минимум, двух условий. Во-первых, все используемые технические средства (в частности, оборудование передачи и кабели с оптическими волокнами) должны обеспечивать очень низкую вероятность отказа линии передачи. Во-вторых, повреждение кабеля при ремонтных и строительных работах, которые прово-

дятся различными организациями, должно стать исключительным случаем, вероятность которого близка к нулю.

Сети доступа располагаются на сравнительно небольшой территории. Информация между терминалом пользователя и границей базовой сети проходит через небольшое количество элементов. В простейшем случае может использоваться только один элемент – двухпроводная цепь, соединяющая телефонный аппарат с коммутационной станцией. Это заметно упрощает исследование проблем, касающихся надежности сетей. Даже в самых сложных случаях не приходится сталкиваться с моделями, которые характерны для сетей регионального уровня [15].

Литература к Приложению 3

1. М.Я. Выгодский. Справочник по элементарной математике. – М.: Астрель, 2003.
2. Ф. Харари. Теория графов. – М.: Эдиториал УРСС, 2003.
3. Huawei Technologies in Chine. – Chenzhen, Huawei Technologies Co, Ltd., 1999.
4. И.М. Жданов, Е.И. Кучерявый. Построение городских телефонных сетей. – М.: Связь, 1972.
5. M. Drieskens, K. Stordahl, B.T. Olsen, L. A. Ims, T. Øverli, A. Zaganiaris, M. Ravera. Introducing Advanced Residential Services in a competitive environment. From Project 2087-TITAN. – International Communications Forecasting Conference, 1995, Toronto, Canada.
6. N. Sokolov. "Geometric Models of the Transmission Networks", Vol. "B", Proceedings of Symposium Telecommunications-92, Poland, 1992.
7. N. Sokolov. Transmission Networks Structure for the B-ISDN. – Proceedings of St. Petersburg Regional International Teletraffic Seminar "Digital Communication Network Management", 1993.
8. В.Н. Рогинский, А.Д. Харкевич, М.А. Шнепс, Г.Б. Давыдов, А.Я. Толчан. Теория сетей связи. Под ред. В.Н. Рогинского. – М.: Радио и связь, 1981.
9. С.В. Яблонский. Введение в дискретную математику. – М.: Высшая школа, 2003.
10. Н.А. Соколов. Телекоммуникационные сети. – М.: Альварес Паблишинг, 2004.
11. И.М. Жданов. О расчете средней длины абонентской линии. – Сборник научных трудов ЛЭИС, 1955.
12. Б.П. Филин. Методы анализа структурной надежности сетей связи. – М. Радио и связь, 1988.
13. О.И. Фаерберг, В.О. Шварцман. Качество услуг связи. – М.: ИРИАС, 2005.
14. N. Sokolov, A. Alter. Broadband Wireless Access and Communications Reliability Provision. – Proceedings of the Moscow International Conference "Broadband Russia & CIS Summit", Moscow, 2004.
15. А.Т. Абдыкалыков, Л.А. Кокурин, В.Ю. Лузин, М.В. Носов, А.С. Романов, Ю.В. Седельников, Б.П. Филин. Расчет надежности автоматизированной системы Московской областной ОСОДУ. – "Электросвязь", №4, 2004.

Libenter id quod cupumus credimus.
(Мы легко верим в то, что хотим)

Приложение 4. Методы прогнозирования в электросвязи

In patria natus non est propheta vocatus.
(Нет пророка в своем отечестве)

П4.1. Выбор метода прогнозирования

Одна из причин перехода к ССП – заинтересованность группы пользователей, приносящей Оператору ТФОП существенные доходы, в новых видах услуг. Некоторые требования этой группы пользователей стимулируют радикальные изменения в разных компонентах телекоммуникационной сети. Весьма существенные изменения происходят в сетях доступа. Желательно, чтобы основные качественные изменения были выявлены при разработке прогнозов, необходимых для выбора рациональных принципов дальнейшего развития инфокоммуникационной системы.

В процессе планирования телекоммуникационных сетей используются различные методы прогнозирования [1, 2]. Выбор метода осуществляется с учетом поставленной задачи, характера рассматриваемого процесса и доступной информации (статистической и иной природы).

Оценки пропускной способности сети важны для оптимального выбора проектных решений, которые касаются транспортных ресурсов и коммутационного оборудования. Исходные данные для таких оценок могут быть получены только на основе прогнозов трафика, порождаемого коммутируемыми сетями. Этот трафик, в свою очередь, может быть рассчитан, если известны прогнозы, связанные с перечнем поддерживаемых услуг и их основных атрибутов. Важную роль играют показатели качества обслуживания, которые будут установлены для перспективной телекоммуникационной сети.

Для пропускной способности сети, перечня поддерживаемых ею услуг и показателей качества обслуживания очень важно – с практической точки зрения – получить два вида прогностических оценок. Во-первых, Оператор должен знать краткосрочный прогноз на ближайшие годы. Во-вторых, для разработки разумной технической политики Оператору необходим также и долгосрочный прогноз на десять-двадцать лет, то есть на период срока службы сложных видов телекоммуникационного оборудования.

В процессе планирования телефонной сети важными прогностическими оценками считаются численность потенциальных абонентов и параметры нагрузки. Знание этих данных плюс многолетний опыт эксплуатации ТФОП упрощает решение большинства задач прогнозирования. Для ССП задачи прогнозирования существенно усложняются. Достаточно привести пример с пользователями Internet. Для проектирования сети важно знать не только численность пользователей Internet, но и их распределение с точки зрения используемых транспортных ресурсов. Если пользователь обращается в Internet при помощи оборудования xDSL, то результаты расчета транспортных ресурсов заметно отличаются от оценок, полученных ранее для доступа через модем.

Прогнозирование, как правило, выполняется для инфокоммуникационной системы в целом, а для местных сетей используется лишь часть полученных результатов. Задачи прогнозирования целесообразно рассматривать в полном объеме, то есть с точки зрения проектирования, построения, эксплуатации и развития инфокоммуникационной системы. Интересный подход к прогнозированию и практически значимые результаты приведены в работах [3, 4], которые были опубликованы в 1995 году. На основе этих работ в [5] был предложен простой метод прогнозирования, основанный на результатах, которые были получены для инфокоммуникационных систем в развитых странах, в качестве аналога. В [6 – 10] анализируются методы прогнозирования, полезные для решения прогностических задач, которые свойственны инфокоммуникационным системам.

Подобные методы эффективны в тех случаях, когда хорошо известна предыстория исследуемого процесса. Пример прогнозирования процессов, представленных функциями

$F_1(t)$ и $F_2(t)$, иллюстрирует рисунок П4.1. Предполагается, что статистические данные, накопленные за период времени $[t_r, t_0]$, позволяют определить аналитические выражения для функций $F_1(t)$ и $F_2(t)$. Статистические данные отображены квадратиками на отрезке $[t_r, t_0]$. Принципы выбора кривой по статистическим данным, представленным в виде дискретных значений, изложены в последнем разделе данного Приложения.

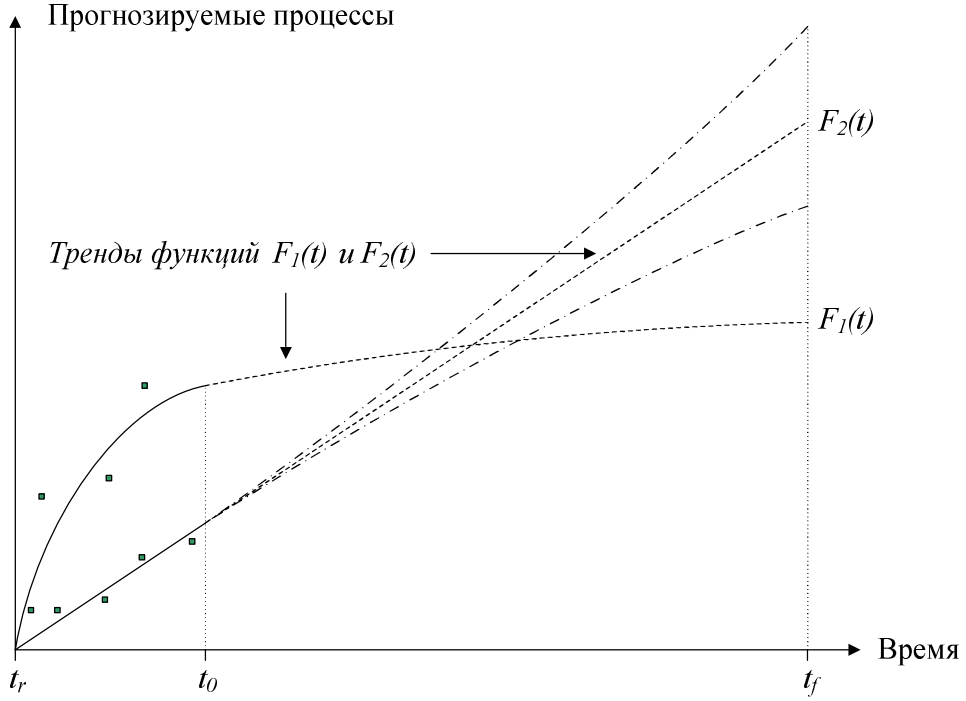


Рисунок П4.1. Пример прогнозирования двух процессов

Поставленная задача сводится к вычислению значения обеих функций для периода прогнозирования – $[t_0, t_f]$. Соответствующие тренды изображены пунктирными линиями. Кроме того, целесообразно оценить доверительные интервалы [1, 8]. На рисунке П4.1 они показаны штрихпунктирными линиями для функции $F_2(t)$.

Сложность разработки прогнозов – помимо проблем с достоверностью необходимой статистической информации – объясняется обстоятельствами такого рода:

- некоторые виды новых услуг столь специфичны, что для их прогнозирования сложно подобрать адекватные аналоги;
- ряду сегментов отечественного инфокоммуникационного рынка (характерный пример – мобильная связь) свойственны процессы развития, отличающиеся от тенденций, которые были тщательно изучены Операторами развитых стран.

Для повышения достоверности предсказания исследуемой величины целесообразно использовать несколько методов прогноза. Практически во всех случаях эффективен метод экспертных оценок. Для его проведения можно использовать подход, который основан на сложных экспертизах [1]. Он полезен для оценки поведения процессов, природа которых мало изучена.

В последние годы широкое распространение для решения задач прогнозирования получил *метод Делфи* [11] – "Delphi Method". Коллективное обсуждение проблем часто искажается из-за того, что некоторые эксперты, участвующие в дискуссии, вольно или невольно оказывают влияние на аудиторию. Метод Делфи основан на полном отказе от коллективной дискуссии, что исключает влияние некоторых психологических факторов: согласие с позицией более авторитетных коллег или желание присоединиться к мнению большинства. Это приводит к росту времени, необходимого для получения результатов.

Для прогнозирования некоторых процессов целесообразно использовать метод, основанный на учете одного из самых важных экономических показателей – валового внутреннего продукта (ВВП) на душу населения. В ряде публикаций, например в [3, 12], обоснована оценка спроса на инфокоммуникационные услуги – $D(t)$, которую можно представить в таком виде:

$$D(t) = \left(\frac{G_t}{G_0} \right)^b F_j(t). \qquad (П4.1)$$

Величины G_t и G_0 – значения ВВП на душу населения для прогнозируемого момента времени t и начальной точки на оси "Время". Коэффициент b определяет степень влияния роста ВВП на уровень платежеспособного спроса для оцениваемой услуги. Функция $F_j(t)$ – одна из прогностических кривых. Часто эти кривые относятся к S*-образным моделям*, которые хорошо отражают развитие процесса, проходящего три основных этапа: медленный старт, интенсивный рост, фаза насыщения. Характерным примером S-образной модели служит логистическая кривая, часто используемая для прогнозирования [12, 13].

Следует выделить сравнительно новые методы, которые могут быть использованы для прогнозирования характеристик функционирования инфокоммуникационных систем. Один из таких методов – использование фильтра Калмана [6, 14]. Он представляет собой рекурсивное устройство оценки. Алгоритм работы устройства такого рода позволяет корректировать полученный результат за счет анализа каждой новой выборки. Другой метод базируется на нейронных сетях [15]. Их построение и анализ в последние годы эффективно используются для решения ряда сложных задач.

Фильтр Калмана не столь эффективен для прогнозов, касающихся, например, потенциального рынка новых услуг и современных технологий. Областью эффективного применения калмановской фильтрации, по всей видимости, можно считать сравнительно длительные процессы, меняющие свой характер в некоторых точках на оси "Время". В частности, фильтр Калмана помогает обнаружить точку перегиба S-образной кривой [13]. Фильтр Калмана целесообразно использовать в качестве дополнения к другим методам прогнозирования характеристик инфокоммуникационных сетей. На практике, если нет необходимости принимать решение в течение небольшого отрезка времени, вместо фильтра Калмана можно использовать результаты периодического мониторинга исследуемого процесса. Важная задача этого мониторинга – фиксация изменений тренда.

Интересный подход к прогнозированию связан с концепцией о диффузии инноваций [16, 17]. На основе общих соображений, касающихся этой концепции, авторами работы [18] была предложена методика выбора наилучших параметров логистической кривой для описания процессов развития рынка мобильной связи. Методику, которая предложена в [18], можно также считать развитием идеи "прогнозирование по аналогу" [5]. Исходная информация для прогноза выбирается из статистических данных для развитых стран. При этом максимальная ценность статистических данных присуща тем странам, в которых экономические показатели схожи с российскими.

На рисунке П4.2, в качестве примера, показано изменение требований к скорости обмена информацией для абонентов квартирного сектора в США [19, 20]. Этот прогноз был разработан компанией Technology Future Inc. Судя по характеру графиков, которые показаны на рисунке П4.2, требования к скорости обмена информацией через сеть доступа можно представить суперпозицией нескольких функций, каждая из которых очень похожа на логистическую кривую.

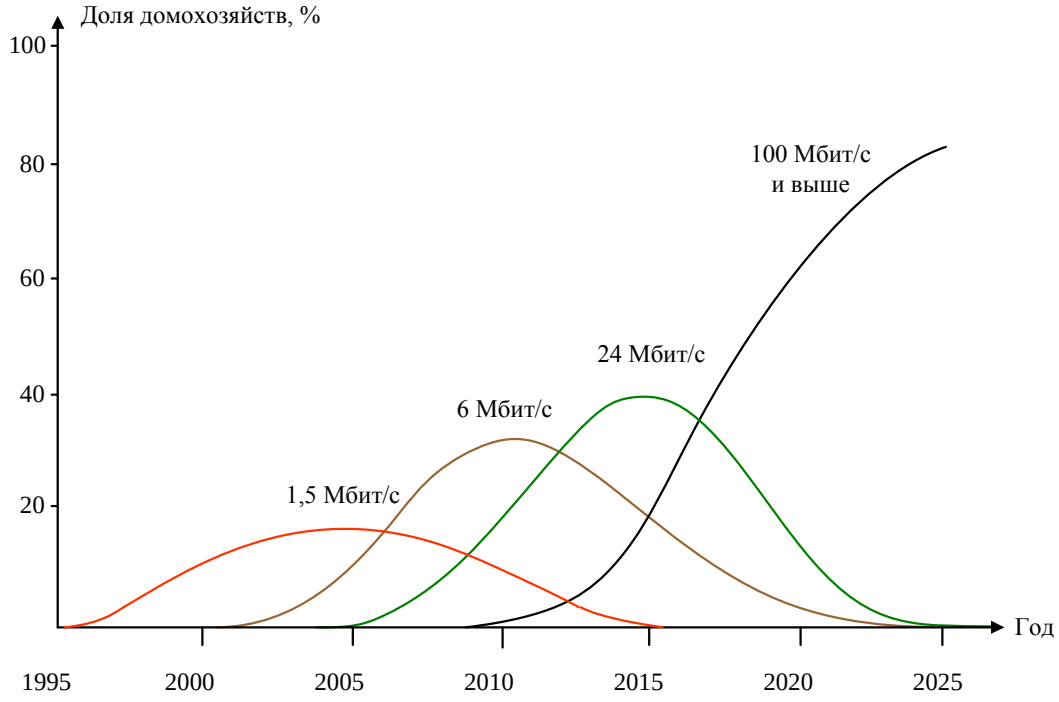


Рисунок П4.2. Изменение требований к полосе пропускания сети доступа

В последнее время проявились новые тенденции развития сетей электросвязи, которые ставят под сомнение возможность широкого применения S-образных кривых. В частности, развитие сетей мобильной связи и IP телефонии [21, 22] привело в ряде стран к снижению емкости ТФОП (точнее – ее фиксированного компонента). Процесс подобного характера не предполагался ни одним прогнозом. Тренды снижения емкости ТФОП (сети фиксированной связи) можно представить разными кривыми. На рисунке П4.3 приведены два примера кривых, иллюстрирующие возможный характер развития рассматриваемого процесса.

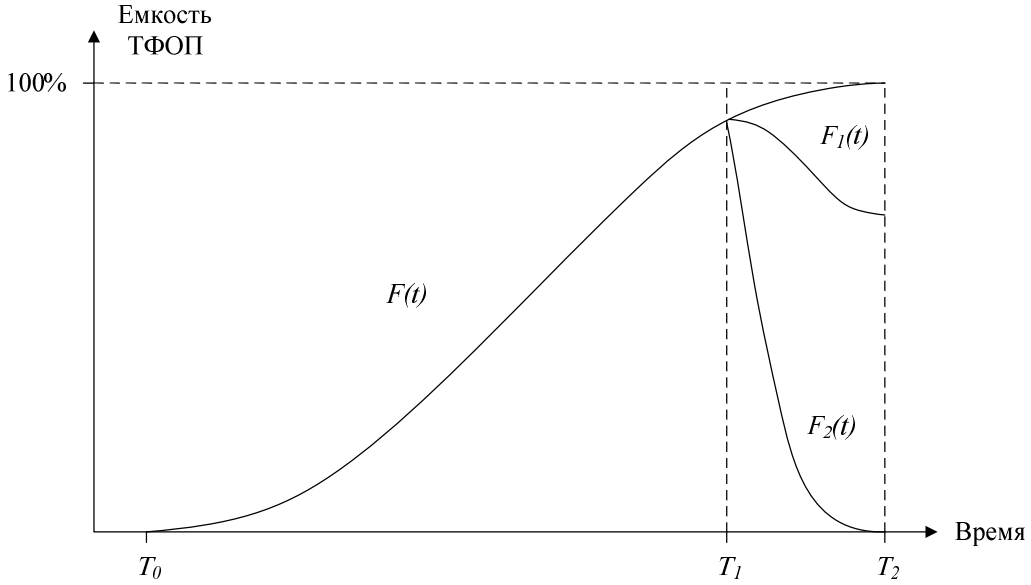


Рисунок П4.3. Возможные тренды снижения емкости ТФОП

Кривая на отрезке $[T_0, T_1)$ отображает непрерывный рост емкости ТФОП до того момента времени, когда изменился тренд исследуемого процесса. Предыдущий прогноз предусматривал дальнейший рост емкости ТФОП на участке $[T_1, T_2)$ вплоть до полного удовлетворения спроса – кривая $F(t)$. Максимальная емкость ТФОП, принятая за 100%,

определяется при помощи разных методов прогнозирования [1, 3, 23, 24]. На отрезке $[T_1, T_2)$ показаны две кривые. Функция $F_1(t)$ предполагает, что процесс снижения емкости может быть представлен "инвертированной" S-образной кривой. Подобные прогнозы представляются правдоподобными. Кривая $F_2(t)$ соответствует точке зрения, которую следует считать маргинальной. Она отражает позицию ряда специалистов, считающих, что фиксированная телефонная связь "умирает". По всей видимости, такая ситуация – пример ошибочной экстраполяции данных, полученных за короткий период времени.

Цель прогнозирования часто формулируется в виде девиза *"Попасть в порядок"*. Для некоторых характеристик инфокоммуникационной системы оценка порядка изучаемых трендов вполне достаточна. Например, затраты на создание транспортных ресурсов имеют устойчивую тенденцию к снижению [25, 26]. Кроме того, современные системы передачи имеют номиналы пропускной способности, различающиеся в четыре раза (оборудование SDH) или более (средства, использующие пакетные технологии). С учетом обстоятельств такого рода повышение точности прогноза не всегда представляется актуальной задачей.

Для того, чтобы "Попасть в порядок", можно использовать метод прогнозирования, основанный на схожести процессов развития инфокоммуникационной системы в России и в развитых странах [5]. Такая гипотеза базируется на анализе имеющейся статистики. Различия можно обнаружить в трех показателях исследуемых процессов:

- абсолютные значения максимума (*амплитуда*);
- скорость развития (*частота*);
- сдвиг начальной точки на оси "Время" (*фаза*).

Эти факторы целесообразно учитывать модификацией функции $F_j(t)$. Изменения амплитуды предлагается учитывать, умножая выражение (П4.1) на коэффициент k_A. Его оценка может осуществляться по такой формуле:

$$k_A = \frac{G_R(t_{0R})}{G_A(t_{0A})}. \qquad \text{(П4.2)}$$

Величина $G_R(t_{0R})$ определяет душевой ВВП для России к моменту введения новой услуги. Величина $G_A(t_{0A})$ – душевой ВВП для аналога также к моменту введения новой услуги. В качестве аналога выбирается процесс развития рынка услуг в стране, для которой накоплена достоверная статистическая информация. Если известен характер идентичных процессов для ряда стран или какого-либо региона, то в качестве величины $G_A(t_{0A})$ выбирается среднее значение, что обычно повышает достоверность полученных результатов.

Изменения частоты можно учесть, заменяя переменную t в формуле $F_j(t)$. Новая переменная – t_F определяется следующим образом:

$$t_F = t\frac{H_A}{H_R}\xi. \qquad \text{(П4.3)}$$

Величина H_A равна среднему тарифу, установленному Оператором, сеть которого выбрана в качестве аналога. В знаменатель формулы (П4.3) подставляется средний тариф – H_R, который предполагается установить. Поправочный коэффициент ξ учитывает особенности рассматриваемого процесса с точки зрения скорости его развития. Если правила оценки этого коэффициента не представляются очевидными, то можно считать, что $\xi = 1$. Подтверждением справедливости подхода, который основан на отношении H_A к H_R, служит график, приведенный в [27]. Он воспроизведен на рисунке П4.4. Следует учитывать, что указанные значения тарифов использовались в самом начале XXI века.

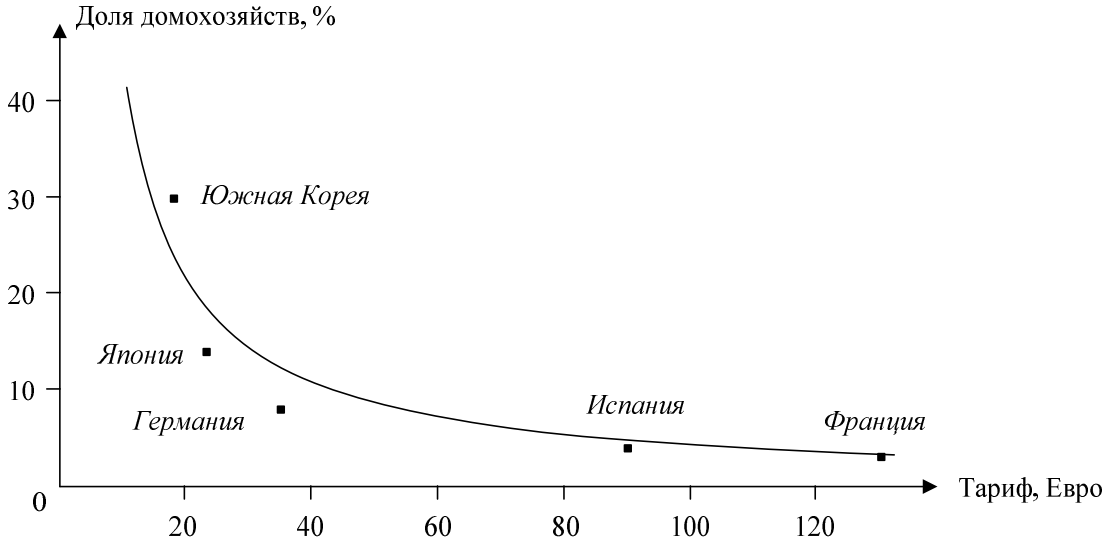


Рисунок П4.4. Влияние тарифов на рынок услуг

Изменение фазы сводится к сдвигу графика вправо по оси "Время" на некоторую величину τ. Значение этой величины определяется очень просто. Для этого необходимо установить год начала исследуемого процесса в стране, которая выбрана в качестве модели, и узнать планы российского Оператора относительно начала коммерческого использования услуги или технологии.

Для российских телекоммуникационных сетей формула, определяющая прогноз исследуемого процесса – $D_R(t)$, может быть представлена в такой редакции:

$$D_R(t) = k_A \left(\frac{G_t}{G_0} \right)^b F_j(t_F - \tau). \qquad (П4.4)$$

В [28] приведено соотношение, которое принято для прогнозирования в странах Европейского Союза (ЕС). В нем величины в круглых скобках определяют значения душевого ВВП для конкретной страны и ЕС в целом. В упомянутой формуле $b = 1$. Возможно, что такое значение показателя степени иногда можно принять и для формулы (П4.4). В большинстве случаев, когда услуга воспринимается пользователями как очень полезная, можно считать, что $b = 0$.

Для ряда характеристик инфокоммуникационной системы обычно известна история процесса. Типичный пример – рост емкости ТФОП. Теоретически, можно обнаружить статистические данные, относящиеся к концу XIX века. К сожалению, правила подсчета емкости ТФОП периодически менялись. Например, часть абонентов ведомственных сетей, для которой выделялись ресурсы нумерации ТФОП, иногда приплюсовывалась к общему количеству абонентов. В ряде случаев емкость ТФОП вычислялась с учетом таксофонов. Поэтому опубликованные статистические данные можно представить в виде гистограммы, каждый отсчет которой в год i представляет собой истинное значение емкости ТФОП $N(i)$ с некоторой ошибкой $\pm\Delta N(i)$. Функцию $N(i)$ можно рассматривать как тренд процесса развития ТФОП. Величину $\Delta N(i)$ целесообразно считать случайной ошибкой. Значение этой ошибки, как правило, не зависит от i.

Наличие подобной информации о функции $N(i)$ позволяет эффективно использовать формализованные методы прогнозирования. Среди них можно выделить экстраполяцию тенденций. На рисунке П4.5 показана гистограмма $N(i)$, определенная для пяти лет. Предполагается, что все значения $N(i)$ достоверны.

Рисунок П4.5. Гистограмма $N(i)$ и ее аппроксимация непрерывной кривой

Исследуемый процесс можно также представить непрерывной кривой $F(t)$. Обычно эта кривая определяется не только для множества $\{I\}$, но и для любого момента времени t, лежащего в границах рассматриваемого интервала на оси абсцисс. Поэтому можно говорить об аппроксимирующей кривой вида $F(t)$. В точках $t = ki$ разница между функциями $N(i)$ и $F(t)$ представляет собой ошибку аппроксимации – $\Delta(i)$.

Допустим, что необходимо разработать прогноз развития исследуемого процесса для следующих трех лет. Предполагается, что дальнейшее развитие процесса $N(i)$ – с высокой вероятностью – определяется тем же законом. Это означает, что функция $F(t)$ в точках $t = ki$ будет с приемлемой точностью определять искомые значения $N(i)$. На рисунке П4.6 показана экстраполяция кривой $F(t)$. Очевидно, что точность определения величин $N(11)$, $N(11)$ и $N(13)$ в значительной мере зависит от типа кривой $F(t)$.

Рисунок П4.6. Экстраполяция непрерывной кривой

Выбор этой кривой осуществляется с учетом двух факторов. Во-первых, поведение функции $F(t)$ должно соответствовать характеру исследуемого процесса. Во-вторых, величина ошибки, обусловленной заменой функции $N(i)$, должна быть минимальной.

Для рассматриваемого примера в качестве функции $F(t)$ можно выбрать полином третьей степени, что обеспечит точное совпадение со статистическими данными в точках $t = ki$ при $k \le 3$. Очевидно, что такой подход будет противоречить природе исследуемого процесса: ошибки в расчете значений $N(i)$ при $k \ge 4$ могут быть очень существенными. При выборе непрерывной кривой, предназначенной для прогнозирования, используются дополнительные приемы. Один из них – *"Прогнозирование прошлого"*.

Словосочетание "прогнозирование прошлого" часто ассоциируется с ретроникой [29]. Здесь этот термин используется для анализа процессов, которые не относятся ни к истории, ни к философии. На рисунке П4.7 показана гистограмма, которая содержит три множества данных. Множество $\{X_2\}$ содержит тот набор данных, который используется для прогнозирования на перспективу. Множество $\{X_1\}$ включает ретроспективный набор данных, которые не нужны для прогнозирования на перспективу, то есть для определения множества $\{X_3\}$.

Рисунок П4.7. К вопросу о "прогнозирования прошлого"

Суть "прогнозирования прошлого" заключается в реализации алгоритма, который может быть представлен такой последовательностью операций:

- анализ множества $\{X_2\}$ позволяет выявить тенденцию, которая может быть экстраполирована на перспективу за счет выбора вида функции $F(t)$ методом наименьших квадратов или иным способом;
- функция $F(t)$ используется и для расчета значений исследуемого процесса на множестве $\{X_1\}$;
- если выбранная аппроксимация хорошо совпадает с реальными данными для множества $\{X_1\}$, то выбор функции $F(t)$ считается удачным, и далее именно она используется для прогнозирования – определения элементов множества $\{X_3\}$;
- если выбранная аппроксимация не совпадает с анализируемым процессом для множества $\{X_1\}$, то следует провести дополнительные исследования для выбора подходящей функции $F(t)$.

"Прогнозирование прошлого" позволяет решить ряд важных задач. В частности, можно оценить статистические данные за прошедшие годы, если они не собирались или недоступны. Если такие данные имеются, то можно проверить точность результатов "прогнозирования прошлого". При хорошем совпадении результатов прогнозирования и статистики можно считать, что метод, предлагаемый для оценки исследуемой величины, выбран удачно.

Функция $F(t)$ обычно выбирается из ограниченной совокупности кривых [13, 30]. При прогнозировании долгосрочного спроса на услуги, связанные с широкополосным доступом, в США были успешно использованы модели Гомперца и Фишера-При [3, 28]. Лучшее совпадение с результатами, полученными методом экспертных оценок, показал закон Фишера-При. Прогнозирование проникновения мобильной связи в России, судя по результатам, приведенным в [28], лучше всего осуществлять на основе кривых Гомперца, логистической и преобразованной экспоненциальной модели.

В работах [3, 4] предложены прогностические оценки, основанные на данных о ВВП. В этих работах оценивается рынок новых видов услуг и соответствующий трафик. Спрос на такие услуги прямо связан с уровнем ВВП на душу населения. Поэтому подход, изложенный в указанных статьях, представляется логичным. В [4] предложена оценка спроса на широкополосные услуги – $D(t)$, включающая два значения ВВП:

$$D(t) = a\left(\frac{G_t}{G_0}\right)^b \frac{1}{1+e^{c+dt}}. \qquad (П4.5)$$

Величины G_t и G_0 – значения ВВП на душу населения для прогнозируемого момента времени t и начальной точки на оси "Время". Смысл коэффициентов, входящих в формулу (П4.5), очевиден. Следует отметить, что $d < 0$.

Плохо выявляемые ошибки прогнозирования обычно возникают в тех случаях, когда исследуемый процесс имеет точку перегиба. Характерный пример такого процесса – спрос на услуги телеграфной связи. В начале девяностых годов XX века в России продолжался рост трафика в сетях телеграфной связи. Затем наступил устойчивый спад спроса на все услуги, которые связаны с телеграфией. Если воспользоваться статистическими данными конца восьмидесятых и начала девяностых годов прошлого столетия, то долгосрочный прогноз предусматривал бы рост телеграфного трафика и в XXI веке.

Данный пример свидетельствует об опасности "слепой" экстраполяции тенденций. Соображения подобного рода объясняют тот факт, что *формализованные методы* обычно рекомендуется использовать для разработки *краткосрочных прогнозов* [13, 31, 32]. Словосочетание "краткосрочное прогнозирование" для инфокоммуникационной системы, которая обладает свойствами консервативности и инерционности [33], следует уточнить. Обычно речь идет о двух или трех годах. Тем не менее, для каждого процесса необходима конкретизация. Например, для роста емкости ТФОП на протяжении нескольких десятков лет формализованные методы прогнозирования можно было применять с весьма высокой эффективностью. Ошибка была минимальной. Развитие рынка мобильной связи изменяет характер дальнейшего роста емкости ТФОП. Поэтому следует провести тщательный анализ, а потом судить о возможности дальнейшего использования "старых" методов прогнозирования емкости ТФОП.

Прогнозирование по аналогу, основные принципы которого были изложены выше, представляется полезным инструментом для решения ряда практических задач. Если, например, организатор опроса затрудняется оценить характер исследуемого процесса, то можно распределить экспертов на две группы с одинаковой численностью. В других случаях соотношение численности обеих групп будет определяться организатором опроса с учетом его представления об исследуемом процессе. Во вторую группу целесообразно включать экспертов, которым свойственна низкая степень "внушаемости" [34]. Данное утверждение основано на том очевидном факте, что аналог не всегда может быть выбран

удачно. Кроме того, даже самый лучший аналог не может учитывать все особенности исследуемой системы.

Раздельная обработка результатов, полученных от двух групп экспертов, означает следующее:

- для каждой группы экспертов с помощью известных методов математической статистики устанавливается близость ответов;
- в результате формируются два варианта ответа на вопрос, сформулированный перед каждой группой экспертов;
- затем с помощью методов математической статистики или иным способом устанавливается близость двух усредненных ответов;
- если степень совпадения усредненных ответов приемлема с точки зрения организатора опроса, то задачу прогнозирования можно считать решенной (в противном случае нужны дополнительные исследования).

Целесообразно совершенствовать и сам метод прогнозирования по аналогу. В частности, полезно уточнить принципы предварительной обработки всей доступной информации, когда известно несколько прогностических кривых, полученных из разных источников. Необходимо также отметить, что следует очень аккуратно пользоваться программными средствами, которые предназначены для решения задач прогнозирования. Подобные средства, содержащиеся, например, в пакетах MATLAB и SPSS, не учитывают специфику задач, которая свойственна телекоммуникационным сетям. Строго говоря, практически каждому исследуемому процессу свойственны некоторые особенности. Для ряда процессов даже очень корректная обработка имеющейся статистики [35, 36] не может стать гарантией приемлемой точности прогнозов. По этой причине результаты прогнозирования, полученные любым методом, необходимо тщательно анализировать до формулировки окончательных выводов.

Ignorantia non est argumentum.
(Незнание – не довод)

П4.2. Особенности прогнозирования пропускной способности

До того момента времени, когда появилась возможность поддержки услуг цифровой сети интегрального обслуживания (ЦСИО), всем абонентам ТФОП предоставлялись ресурсы доступа с идентичной пропускной способностью. Она была определена нормами, которые установлены для канала ТЧ.

Пропускную способность сети доступа в момент времени t – C_t можно оценить произведением величины полосы пропускания канала ТЧ – f_0 (она равна 3,1 кГц) на число созданных АЛ – N_t:

$$C_t = f_0 N_t. \qquad (П4.6)$$

Это означает, что поставленная задача сводится к оценке количества АЛ к моменту времени t. В последние годы наблюдается очень заметное расслоение (диверсификация) клиентской базы Оператора связи. Простейший пример – выделение трех видов каналов доступа, которые различаются пропускной способностью. Допустим, что к моменту времени t общая численность абонентов определяется следующей суммой:

$$N_t = N_t^I + N_t^{II} + N_t^{III}. \qquad (П4.7)$$

Для первой группы пользователей достаточны ресурсы канала ТЧ. Для цифровой коммутационной станции эквивалентом канала ТЧ служит основной цифровой канал (ОЦК), пропускная способность которого равна 64 кбит/с. Вторая группа пользователей ориентируется на доступ со скоростью 2048 кбит/с. Для третьей группы пользователей необходима скорость доступа в сеть на порядок выше. Номинал 2048 кбит/с можно рас-

сматривать как 30 ОЦК. Тогда формула для оценки пропускной способности сети доступа может быть представлена в следующем виде:

$$C_t = N_t^I + 30N_t^{II} + 300N_t^{III}. \qquad (П4.8)$$

Очевидно, что поставленная задача сводится к прогнозированию трех слагаемых: N_t^I, N_t^{II} и N_t^{III}. Причем погрешность при оценке величины N_t^{III} наиболее критична с точки зрения ошибки прогноза. К сожалению, максимальная сложность при разработке прогнозов характерна именно для величины N_t^{III}. Положение усугубляется еще и тем, что меняются не только величины N_t^k, но и требования к скорости обмена информацией B_t^k, которые в формуле (П4.8) представлены постоянными коэффициентами. Следует также учесть, что множество терминалов в некоторых случаях целесообразно делить на большее число групп (в общем случае – на M). С учетом этих соображений формулу (П4.8) лучше переписать так:

$$C_t = \sum_{k=1}^{M} B_t^k N_t^k. \qquad (П4.9)$$

Анализ исходных данных, собранных для разработки проектов по модернизации ряда сетей доступа, свидетельствует об устойчивом характере – в настоящее время – таких неравенств:

$$N_t^1 >> \sum_{k=2}^{M} N_t^k, \quad N_t^k > N_t^{k+1}, \quad B_t^k << B_t^{k+1}. \qquad (П4.10)$$

По мере роста индекса k, как правило, снижается достоверность прогнозов, которые касаются не только числа групп пользователей N_t^k, но и востребованной ими скорости обмена информацией B_t^k.

Usus est optimus magister.
(Опыт – наилучший учитель)

П4.3. Аспекты прогнозирования поддерживаемых услуг

Перечень инфокоммуникационных услуг, предоставляемых пользователям, образует множество $\{S\}$. В зависимости от способа детализации услуг множество $\{S\}$ может насчитывать десятки или сотни наименований. Безусловно, лишь некоторая часть из них – подмножество $\{S_0\}$ – интересна с точки зрения доходов Оператора. Прогнозирование актуально именно для подмножества $\{S_0\}$. Поэтому для него целесообразно разработать классификацию, ориентированную на задачи планирования сети.

Для начала можно считать, что подмножество $\{S_0\}$ включает три элемента. Эти элементы образованы услугами, связанными с трафиком речи, данных и видео. Данные, содержащиеся в отчетах Операторов ряда стран, и соответствующие прогностические оценки [37] свидетельствуют о том, что радикального снижения доли доходов, которые приносит обслуживание трафика речи, не ожидается.

Несомненно, доходы от трафика данных будут возрастать по мере развития рынка Internet. Аналогичная тенденция характерна для рынка услуг, которые прямо или косвенно связаны с видеоинформацией. Например, по заказу национальной лиги потребителей (National Consumer League) США было проведено исследование потенциального рынка для телевизоров стандарта телевидения высокой четкости. Эти данные интересны и с другой точки зрения: судя по опросам, распределению средств вычислительной техники также свойственна заметная неравномерность. Правда, для некоторой доли семей число исполь-

зуемых дома персональных компьютеров равно нулю, а наличие четырех и более подобных терминалов – случай исключительный.

В таблице П4.1 приведено распределение, которое было получено в результате упомянутого опроса. Среднестатистическая семья в США имеет 2,7 телевизоров. Различие (по сравнению с Россией) в 0,9 терминалов представляется существенным, если учитывать пропускную способность, необходимую для передачи телевизионного сигнала. Для прогнозирования пропускной способности телекоммуникационной сети важно знать и распределение количества телевизионных приемников на перспективу. Вероятно, данные, которые приведены в таблице П4.1, можно считать "аналогом" при прогнозировании искомого распределения для российских условий.

Таблица П4.1. Распределение телевизионных приемников по домохозяйствам в США

Число телевизоров	1	2	3	4 и более
Доля семей, %	3	48	24	25

Прогноз численности телевизионных приемников позволяет оценить пропускную способность сети доступа в направлениях от сети к терминалу пользователя и обратно. Интерактивное телевидение, реализуемое за счет приставок set-top box [38], требует создания канала от терминала пользователя к устройству обработки заявок пользователей. Величина пропускной способности этого канала существенно меньше тех ресурсов, которые необходимы для получения телевизионного сигнала.

На рисунке П4.8 приведен прогноз доли доходов для рассматриваемого множества $\{S_0\}$. Фактически речь идет о доходах к 2014 году, получаемых за счет обслуживания трех видов трафика: речи, данных и видео.

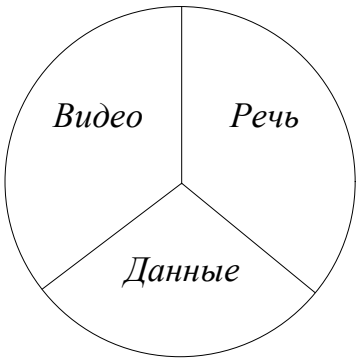


Рисунок П4.8. Прогноз доходов от трех видов обслуживания

Данная гистограмма свидетельствует о весьма интересной тенденции. В ближайшие годы три доли доходов станут примерно идентичными.

Surge et age.
(Поднимись и действуй)

П4.4. Повышение точности прогнозов

Переход к ССП связан с существенным ростом количества широкополосных каналов обмена информацией. Их общая численность будет определять пропускную способность транспортной сети. Очевидно, что некоторые задачи оценки транспортных ресурсов могут успешно решаться с помощью известных методов прогнозирования. Для других задач необходимо разработать новые методы прогнозирования. Их новизна будет, как правило, проявляться в следующем:

- междисциплинарный подход к прогнозированию;
- оригинальный математический аппарат для получения количественных оценок исследуемых процессов.

Применение междисциплинарного подхода к прогнозированию можно трактовать как решение одной задачи разными методами. Простейший пример – история с оценками численности абонентов сотовых сетей, которые независимо проводились разными методами Операторами мобильной связи и "Аналитическим Центром Юрия Левады" [39]. Различие полученных результатов позволило уточнить ряд положений, важных для развития рынка мобильной связи.

Платежеспособный спрос на инфокоммуникационные услуги в значительной мере определяется финансовыми ресурсами. Это утверждение известно с 1963 года, когда А. Джипп опубликовал статью "Благосостояние нации и телефонная плотность" [30]. В этой работе была доказана зависимость между телефонной плотностью – χ и ВВП на душу населения – G:

$$\chi = f(G) \approx k_1 G. \qquad (П4.11)$$

Коэффициент k_1 представляет собой нормирующий множитель. Характер спроса на инфокоммуникационные услуги зависит от неравномерности доходов. Соответствующие вопросы исследованы, в частности, в работах профессора Л.Е. Варакина [12, 40]. Использование результатов, изложенных в этих монографиях, повышает точность ряда прогнозов.

Очень перспективным представляется исследование цикличности в развитии рынка инфокоммуникационных услуг. Не исключено, что идеи выдающихся российских ученых Н.Д. Кондратьева и А.В. Чаянова [12, 41] применимы и "внутри" телекоммуникационной отрасли. Если выявить такие циклы (например, аналог *"длинных волн"* Н.Д. Кондратьева), то некоторые ошибки прогнозирования можно свести к минимуму, вполне приемлемому для решения большинства практически важных задач.

Эволюционные процессы, свойственные инфокоммуникационной системе, можно разделить на два вида. Эволюционные процессы первого вида не подразумевают никаких качественных изменений в инфокоммуникационной системе в целом. Характерным примером подобных процессов может служить трафик речи, монотонно возрастающий вне зависимости от тех технологий передачи и коммутации, которые используются в телекоммуникационной сети. Эволюционные процессы второго вида связаны с весьма существенными – *качественными (!)* – изменениями инфокоммуникационной системы. Одним из примечательных примеров таких процессов можно считать эволюцию принципов построения телекоммуникационной сети при смене технологий передачи и распределения информации.

Исторические аспекты развития электросвязи можно рассматривать, выделив те моменты времени, которые определяют качественные изменения, существенные для всех основных участников инфокоммуникационного рынка: Абонентов, Операторов связи, Производителей оборудования и Поставщиков услуг.

Выбор этих моментов – субъективная процедура. Тем не менее, именно события, перечисленные ниже можно рассматривать как очень значительные:

- появление телефонной связи, основанной на ручной коммутации;
- создание систем автоматической коммутации;
- использование программного управления в коммутационных станциях;
- переход к коммутации и передаче пакетов;

Эти события представлены в таблице П4.2 с указанием примерного времени их начала. Время наступления каждого события – оно указано во втором столбце таблицы – округлялось. Отклонение от истинной даты (а ее, в ряде случаев, определить не так уж и просто) составляет несколько лет.

Таблица П4.2. Основные события в развитии ТФОП

Существенные этапы эволюции телефонии	Время
Ручная коммутация	80-е годы XIX века
Автоматической коммутации	20-е годы XX века
Коммутация на основе программного управления	60-е годы XX века
Коммутация (и передача) пакетов	Начало XXI века

Первое, что бросается в глаза, – наличие циклов длительностью в 40 лет. Они напоминают – по длительности – циклы Кондратьева. Выдающийся российский ученый, Николай Дмитриевич Кондратьев, исследовавший экономические аспекты цикличности, считал, что они имеют всеобщий характер. Данные, приведенные в таблице П4.2, подтверждают это положение. Существенно то, что все радикальные изменения системы телефонной связи сопровождались модификацией одного или более процессов, которые отражают важнейшие характеристики развития ТФОП:

- в восьмидесятые годы XIX века произошел качественный скачок, так как ранее емкость телефонной сети была равна нулю;
- автоматизация ТФОП, вступившая в активную фазу в двадцатые годы XX века, стимулировала заметное увеличение количества обслуживаемых абонентов [42] и сокращение времени установления соединений до приемлемого уровня;
- применение принципов программного управления в АТС в шестидесятые годы XX века позволило качественно изменить систему технической эксплуатации ТФОП и ввести новые виды услуг;
- смена технологий передачи и коммутации дала старт процессу снижения емкости фиксированной части ТФОП, который прослеживается уже несколько лет в США, в Финляндии, в Южной Корее и в других странах, а также стимулировала процессы конвергенции и интеграции.

Причина снижения емкости ТФОП заключается в том, что часть абонентов отказалась от ее услуг, ограничившись возможностями сетей мобильной связи. Кроме того, другая группа абонентов предпочла услуги IP-телефонии. В диаграмме Джиппа, как показывает статистика последних лет, телефонную плотность можно заменить средней величиной трафика дальней связи – Y_S. Тогда зависимость, определяемая выражением (П4.11), сохранится. Среднее значение трафика речи при дальней связи (международной и междугородной), который генерируется одним абонентом, связано с ВВП на душу населения следующим образом:

$$Y_S = f(G) \approx k_2 G. \qquad (П4.12)$$

Коэффициент k_2 – нормирующий множитель. Возможны и другие способы оценки [43], но в первозданном виде диаграмма Джиппа теперь уже не может служить мерой зависимости спроса на услуги телефонной связи от уровня ВВП.

Соображения, изложенные выше, позволяют повысить точность прогноза за счет тщательного анализа причинно-следственных связей. Подобный подход представляется очень важным – особенно при качественных изменениях в инфокоммуникационной системе. Другой путь повышения точности искомых оценок основан на развитии формализованных методов прогнозирования. Он эффективен как дополнение тех методов, которые базируются на исследовании причинно-следственных связей.

Для повышения точности прогнозов полезно представить исследуемую функцию в ее изначальном виде. Большинство статистических данных собирается через одинаковые отрезки времени τ (год, квартал, месяц, неделя, день, час и так далее). Тогда в точке $i\tau$ значение функции $F(t = i\tau)$ определяется числом Q_i. Можно оперировать изменениями функции $F(t)$ за интервал τ – r_i. Очевидно, что $r_i = Q_i - Q_{i-1}$, а $r_0 = Q_0$. В этом случае

преобразование Лапласа-Стилтьеса исследуемой функции можно представить в таком виде:

$$\varphi(s) = \sum_{\{I\}} r_i e^{-i\tau s}. \qquad (П4.13)$$

Если $F(t)$ монотонно возрастает, то ее можно считать функцией распределения. Для этого необходимо нормировать значения r_i так, чтобы сумма всех приращений была равна единице. Оценка значений функции $F(t)$ при $t \neq i\tau$ может быть получена методами интерполяции [44].

В настоящее время прогностические кривые очень редко используют представление исходных данных в виде ступенчатой функции. Среди причин, объясняющих этот факт, можно выделить два фактора. Во-первых, ступенчатая функция не дает того наглядного представления об исследуемом процессе, которое свойственно непрерывным кривым, заданным аналитически. Во-вторых, вычисление ряда характеристик для ступенчатой функции возможно только при использовании средств вычислительной техники. Даже расчет математического ожидания при большом числе приращений становится сложной задачей. Новые методы прогнозирования чаще используют представление исходных данных в виде ступенчатых функций.

Выбор эффективных методов прогнозирования основан на определении сложности исследуемого объекта. С этой целью следует воспользоваться классификацией, которую предложил Стаффорд Бир [31, 45]. В частности, телекоммуникационную сеть можно считать детерминированной сложной системой. Показатель глубины прогнозирования – h определяется отношением длительности рассматриваемого отрезка времени – Δt к величине эволюционного цикла – T_X [45]:

$$h = \frac{\Delta t}{T_X}. \qquad (П4.14)$$

Например, эволюционный цикл сети доступа составляет несколько десятков лет [46]. Поэтому $h < 1$. Более того, для краткосрочного прогнозирования часто справедливо условие $h << 1$. В этих случаях для больших технических систем считаются весьма эффективными формализованные методы прогнозирования [31]. Область использования интуитивных методов прогнозирования определяется значениями $h \approx 1$. Тем не менее, если в течение рассматриваемого периода Δt ожидаются качественные изменения, то целесообразно применять и формализованные, и интуитивные методы прогнозирования. Интуитивные методы в некоторых публикациях называют также квалитативными, а формализованные – квантитативными.

Ряд методов прогнозирования рассчитан на получение оценок, которые принято называть *точечными* [47, 48]. В некоторых случаях важны *интервальные оценки* [44]. В математической статистке часто определяется доверительный интервал. Он может рассматриваться как случайный интервал (X_1, X_2), "покрывающий" истинное значение оцениваемого параметра с некоторой вероятностью $1-\alpha$ [48]. Для определения этого интервала необходимо задать вероятность $1-\alpha$. Эту величину обычно выбирают на уровне 0,95. Расчет доверительного интервала осуществляется стандартными методами математической статистики.

Выше были приведены некоторые кривые, позволяющие описать ожидаемый тренд исследуемой функции – $F(t)$. Набор подобных функций, полезных для практики, весьма обширен. В частности, в [13, 30, 31, 49] рассматриваются следующие соотношения:

$$F_1(t) = a + bt, \qquad (П4.15)$$

$$F_2(t) = a + bt + ct^2, \qquad (П4.16)$$

$$F_3(t) = a + ce^{-bt}, \qquad (П4.17)$$

$$F_4(t) = \frac{a}{1 + ce^{-bt}}, \qquad (П4.18)$$

$$F_5(t) = a \times exp(-ce^{-bt}), \qquad (П4.19)$$

$$F_6(t) = a\int_0^t \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}} dy, \qquad (П4.20)$$

$$F_7(t) = a\int_0^t \frac{1}{y\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\frac{(\ln(y)-\mu)^2}{2\sigma^2}} dy, \qquad (П4.21)$$

$$F_8(t) = \frac{a - c_1 e^{-bt}}{1 + c_2 e^{-bt}}, \qquad (П4.22)$$

$$\ln\left(\frac{F_9(t)}{1 - F_9(t)}\right) = c + bt. \qquad (П4.23)$$

Выбор приемлемого тренда часто осуществляется при помощи *метода наименьших квадратов* [47, 48]. Обычно этот метод используется для решения задачи такого рода:

- для плоскости задано некое множество из N точек с координатами (x_i, y_i);
- объединение всех N точек какой-либо кривой, выраженной в виде известной функции, не представляется возможным без погрешностей;
- необходимо выбрать функцию $f(x)$, обеспечивающую минимальную погрешность при описании исследуемого процесса.

Метод наименьших квадратов восходит к работам выдающихся математиков К. Гаусса и А. Лежандра. Он предлагает выбирать функцию, для которой будет справедливо условие следующего вида:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{N} \left(f(x_i) - y_i \right)^2 \to min. \qquad (П4.24)$$

Одним из важных понятий в математической статистике считается *коэффициент корреляции*. Он определяет степень связи между величинами, характеризующими один и тот же процесс, систему или явление. В таких случаях пользуются многомерной функцией распределения [47, 48]. Для многих прогностических задач интересна оценка линейной зависимости между двумя величинами – x и y. В этом случае коэффициент корреляции – ρ рассчитывается по такой формуле:

$$\rho = \frac{\mathrm{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y}. \qquad (П4.25)$$

Числитель этого отношения – *ковариация* [47, 48], а знаменатель представляет собой произведение среднеквадратических отклонений случайных величин x и y. Линейная связь переменных x и y упрощает вычисление ковариации. При прогнозировании чаще всего известно N значений случайных величин X_i и Y_i. Тогда формула (П4.25) может быть представлена в следующем виде [8]:

$$\rho = \frac{N\sum_{i=1}^{N} X_i Y_i - \sum_{i=1}^{N} X_i \sum_{i=1}^{N} Y_i}{\sqrt{N\sum_{i=1}^{N} X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{N} X_i\right)^2}\sqrt{N\sum_{i=1}^{N} Y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{N} Y_i\right)^2}}. \qquad (П4.26)$$

Для коэффициента корреляции справедливо неравенство: $-1 \le \rho \le +1$. Ковариация и коэффициент корреляции для независимых случайных величин равны нулю (обратное утверждение нельзя считать верным). Для функции $y = a + |b|x$ справедливо равенство $\rho = 1$. Если $y = a - |b|x$, то $\rho = -1$.

Чем ближе модуль коэффициента корреляции к единице, тем теснее связь между переменными. Коэффициент корреляции может рассматриваться как один из критериев удачности подбора аппроксимирующей функции [13]. Дополнительные сведения об исследуемом процессе по N известным значениям случайной величины могут быть получены после вычисления параметра t:

$$t = \frac{\rho\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-\rho^2}}. \qquad (П4.27)$$

Данный параметр позволяет воспользоваться таблицами для $t-$распределения Стьюдента при $(N-2)$ степенях свободы. Распределение Стьюдента позволяет судить о достоверности сделанных ранее выводов даже при небольших значениях N (что часто соответствует практическим задачам). Таблицы данного распределения позволяют для заранее выбранной вероятности определить доверительный интервал [47, 48].

Метод наименьших квадратов часто используется для замены прогностической кривой функцией вида (П4.15). Подразумевается, что имеющиеся статистические данные представлены N значениями величин X_i и Y_i. Тогда коэффициенты a и b определяются такими формулами [8]:

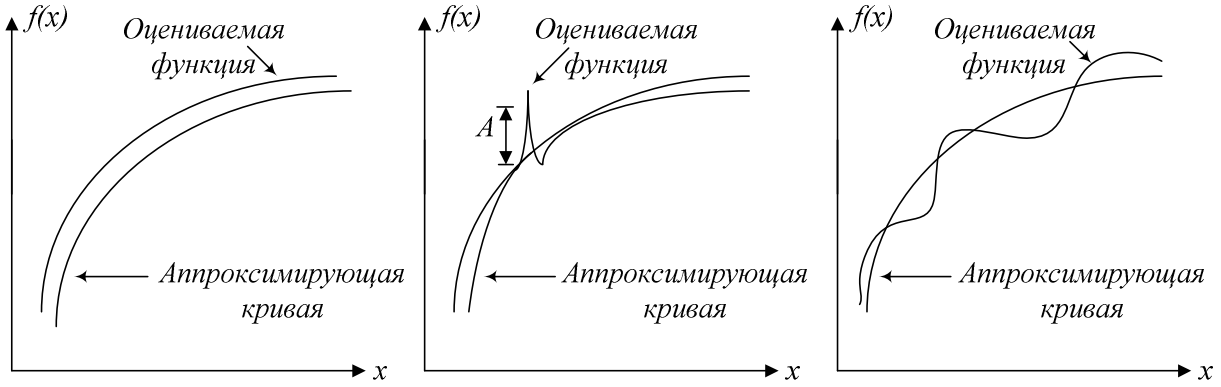
$$b = \frac{N\sum_{i=1}^{N} X_i Y_i - \sum_{i=1}^{N} X_i \sum_{i=1}^{N} Y_i}{N\sum_{i=1}^{N} X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{N} X_i\right)^2}, \quad a = \frac{\sum_{i=1}^{N} Y_i - b\sum_{i=1}^{N} X_i}{N}. \qquad (П4.28)$$

Если прогностическая функция существенно отличается от линейной зависимости, формула (П4.28) не может использоваться. Параметры прогностической кривой находятся численными методами. В этих случаях также полезен метод наименьших квадратов. Им решают разные практические задачи почти двести лет. Иногда этот метод модифицируют. Существует несколько разновидностей метода наименьших квадратов. Среди них следует выделить [50]:

- взвешенный метод наименьших квадратов;
- двухэтапный метод наименьших квадратов.

Эти разновидности метода наименьших квадратов применяются в специфических случаях. В частности, взвешенный метод наименьших квадратов может оказаться весьма эффективным для учета различной степени влияния отдельных компонентов из набора имеющихся данных на исследуемый процесс.

Следует подчеркнуть, что метод наименьших квадратов нельзя рассматривать как инструмент, позволяющий выбрать функцию, которая аппроксимирует исследуемый процесс самым удачным образом. Данное утверждение хорошо иллюстрирует пример, заимствованный из [51] – рисунок П4.9. На этом рисунке показаны три оцениваемые функции $f(x)$ и их возможные аппроксимации.



а) Первый вариант аппроксимации

б) Второй вариант аппроксимации

в) Третий вариант аппроксимации

Рисунок П4.9. Три варианта аппроксимации произвольной функции $f(x)$

Будем полагать, что вычисления по методу наименьших квадратов дают одинаковую величину ошибки ε для всех трех видов аппроксимирующей кривой. Тогда любая из аппроксимаций может считаться приемлемой. В некоторых случаях не годятся те виды аппроксимирующих кривых, для которых разница с оцениваемой функцией больше некой величины A. Тогда вариант (б) нельзя считать приемлемым. Если необходима близость характера первых производных, то и вариант (в) не подходит в качестве аппроксимации оцениваемой функции. Поэтому метод наименьших квадратов следует отнести к таким инструментам, которые обеспечивают поиск необходимых, но отнюдь не достаточных условий для выбора приемлемой аппроксимации оцениваемой функции.

В математической статистике часто используется среднее значение исследуемой величины. В некоторых случаях оперируют термином *"скользящее среднее"*. Вычисление скользящего среднего основано на простом правиле [8]: когда появляется новое значение исследуемой величины, самое старое исключается. Это означает, что число слагаемых при расчете среднего значения остается неизменным. Например, известен ряд значений для некой величины: $Y_1, Y_{2,} ..., Y_N$. Среднее значение для момента времени i – $Y_i^{(1)}$ определяется по известной формуле:

$$Y_i^{(1)} = \sum_{j=1}^{N} Y_j. \qquad (П4.29)$$

Величина $Y_i^{(1)}$ рассматривается как вероятный прогноз на ближайшее время, то есть для момента времени $(i+1)$. Скользящее среднее для этого следующего момента времени – $Y_{i+1}^{(1)}$, представляющее прогноз на ближайшую перспективу, рассчитывается так:

$$Y_{i+1}^{(1)} = \sum_{j=2}^{N+1} Y_j. \qquad (П4.30)$$

Использование скользящего среднего исключает из дальнейшего анализа результаты самых *"старых" наблюдений*. Этот метод целесообразно использовать только там, где подобный подход оправдан. Сглаживание позволяет минимизировать влияние случайных факторов на набор данных, которые используются для решения прогностических задач. Некоторые специалисты сравнивают процедуры подобного вида с применением фильтра, который подавляет сигналы, рассматриваемые как помехи. К сожалению, универсальных рекомендаций, касающихся области применения скользящих средних не существует.

Похожее *"обновление информации"* об исследуемом объекте лежит в основе *метода экспоненциального сглаживания* [8]. Отличие заключает в том, что ни одно предыдущее значение исследуемой величины не отбрасывается. Для уточнения прогноза используется взвешенное скользящее усреднение для всех предыдущих результатов наблюдения. Такая

модель может эффективно применяться даже в том случае, когда не установлено наличие тренда в исследуемом процессе.

При экспоненциальном сглаживании модель исследуемого процесса обновляется после получения новой информации. Чем позже происходит изменение процесса, тем больше тот вес, который ему соответствует. Изменение этого веса, считая с конечного наблюдения, подчиняется такому закону: a – для первого, $(1-a)$ – для второго, $(1-a)^2$ – для третьего и так далее. Естественно, что $0 < a < 1$.

Прогнозируемое значение процесса в момент времени $(t+1)$ – Y_{t+1} рассчитывается по трем величинам. Предполагаются известными предыдущий прогноз – Y_t и истинное значение исследуемой величины – X_t. Кроме того, необходимо оценить величину a. Тогда можно записать формулу для расчета искомой величины в такой форме:

$$Y_{t+1} = aX_t + (1-a)Y_t. \qquad (П4.31)$$

Несколько подобных уравнений для Y_t, Y_{t-1} и так далее позволяют (например, за счет использования метода наименьших квадратов) оценить величину a. При близких к нулю величинах a истинное значение исследуемого процесса не существенно отличается от прогноза.

Для ряда практических задач используется экспоненциальное сглаживание с учетом тренда. Такой подход представляется разумным, если доступная информация позволяет выделить тренд. Метод экспоненциального сглаживания с учетом тренда был предложен в 1957 году. Он известен под названием *метод Хольта* [8, 9]. В ряде публикаций можно найти его модификацию – *метод Хольта-Винтерса*.

Заслуживает упоминания *процедура Бокса-Дженкинса* [8, 9], не так давно вошедшая в практику прогнозирования. Она известна также по аббревиатуре *ARIMA* (AutoRegressive Integrated Moving Average). Программные средства с этим названием включены во многие пакеты, предназначенные для решения основных статистических задач на персональном компьютере.

В последние годы заметный интерес к прогнозированию поведения сложных систем связан с подходом, названным *"русла и джокеры"* [52]. По всей видимости, авторы этого названия перевели соответствующее словосочетание с английского языка, не рассмотрев возможность еще одной интерпретации термина "jokers". В американской технической литературе слово "joker" часто ассоциируется с препятствием. Тогда метод "Channels and Jokers" может быть назван так: *"русла и препятствия"*.

Фаза "русло" хорошо подходит для тех этапов развития сети электросвязи или ее компонентов, а также услуг или технологий, когда соответствующий процесс может быть представлен функцией двух или трех переменных. Для решения прогностических задач подобные функции хорошо известны [2]. Фаза "препятствие" связана с этапами развития инфокоммуникационной системы, для которых характерны радикальные качественные изменения. Обычно процессы, обусловленные подобными изменениями, анализируются с использованием значительного объема информации. Методы исследования фазы "препятствие", как правило, требуют переосмысления уже известных подходов к решению прогностических задач.

Двумя характерными примерами фаз вида "препятствие" для телефонии можно считать технологию VoIP и мобильную связь. Хорошо известны существенные ошибки прогнозирования для рынков услуг VoIP и – особенно – мобильной связи. В настоящее время одним из самых интересных процессов, описываемых фазой "препятствие", следует считать изменения пропускной способности сетей доступа.

Литература к Приложению 4

1. Исследование операций: в 2-х томах. Перевод с английского под редакцией Дж. Моудера, С. Элмаграби. – М.: Мир, 1981.
2. В.В. Глущенко. Прогнозирование. – М.: Вузовская книга, 2000.
3. Hopkins M., Louth G., Bailey H., Yellon R., Ajibutu A., Miva M. A Multi-Faceted Approach to the Forecasting Broadband Demand and Traffic. – IEEE Communications Magazine, February 1995.
4. K. Stordahl, E. Murphy. Forecasting Long-Term Demand for Services in the Residential Market. – IEEE Communications Magazine, February 1995.
5. N. Sokolov. Traffic Forecasting for the Digital Overlay Networks. – Proceedings of International Conference "Distributed Computer Communication Networks. Theory and Application", Tel-Aviv, 1997.
6. К. Брамер, Г. Зиффлинг. Фильтр Калмана-Бьюси. М.: Наука, 1982.
7. С. Дробышевский, В. Носко, Р. Энтов, А. Юдин. Эконометрический анализ динамических рядов основных макроэкономических показателей. – Научные труды Института экономики переходного периода, №34Р, 2001.
8. Д. Ханк, Д. Уичерн, А. Райтс. Бизнес-прогнозирование. – М.: издательский дом "Вильямс", 2003.
9. С.И. Шелобаев. Экономико-математические методы и модели. Второе издание. – М.: Юнити-Дана, 2005.
10. K. Stordahl. Forecasting – An Important Factor for Network Planning. – Telektronikk, № 3/4, 2003.
11. H.A. Linstone. The Delphi Method. Techniques and Application. – New Jersey Institute of Technology, 2002.
12. Л.Е. Варакин. Распределение доходов, технологий и услуг. – М.: МАС, 2002.
13. Е.М. Четыркин. Статистические методы прогнозирования. – М.: Статистика, 1975.
14. С.Я. Виленкин. Статистическая обработка результатов исследования случайных функций. – М.: Энергия, 1979.
15. Р. Каллан. Основные концепции нейронных сетей. – М.: издательский дом "Вильямс", 2003.
16. Р.Д. Блэкуэлл, Дж. Ф. Энджел, П.У. Миниард. Поведение потребителей. – СПб, издательский дом "Питер", 2002.
17. Ю.П. Морозов. Инновационный менеджмент. – М.: "ЮНИТИ", 2001.
18. Ю.В. Деарт, И.В. Бурцев, К.А. Крутяков, А.Ю. Цым. Прогноз развития сотовой связи в России. – Вестник связи, №4, 2005.
19. M. Crawford, D. Verheye. Residential Service Aggregation in the Second Mile. – Alcatel Telecommunications Review, 2nd Quarter 2003.
20. L.K. Vanston, R.L. Hodges. Technology forecasting for telecommunications. – Telektronikk, Volume 100, No. 4, 2004.
21. B. Karlson, A. Bria, J. Lind, P. Lönnqvist, C. Norlin. Wireless Foresight. – Wiley, England, 2003.
22. S. Sale. Competition dictates incumbents' fixed-mobile convergence timelines. – Report of the "Analysys Research", 2005.
23. Г.Б. Давыдов, В.Н. Рогинский, А.Я. Толчан. Сети электросвязи. – М.: Связь, 1977.
24. Перспективные телекоммуникационные технологии. Потенциальные возможности // Под ред. Л.Д. Реймана, Л.Е. Варакина. – М.: МАС, 2001.
25. Р. Кох, Г. Яновский. Эволюция и конвергенция в электросвязи. – М.: Радио и связь, 2001.
26. Н.А. Соколов. Телекоммуникационные сети. Часть 2 "Городские и сельские транспортные сети"– М.: Альварес Паблишинг, 2003.
27. Ф. Юнг. Перспективы развития инфокоммуникаций. – СПб.: "Петеркон", 2003.
28. В.В. Ноздрин. Состояние и прогноз развития широкополосных местных сетей связи. – Мобильные системы, №7, 2004.

29. А. Розов. Ретроника – прогнозирование прошлого. – http://filosofia.ru.
30. В.Б. Булгак, Л.Е. Варакин, Н.Н. Каледина, В.Д. Москвитин, Л.Ф. Шамаева. Новые методы прогнозирования развития телекоммуникаций и их применение в отрасли "Связь Российской Федерации". Под редакцией В.Б. Булгака и Л.Е. Варакина. – М.: МАС, 2000.
31. С.А. Саркисян, В.М. Ахундов, Э.С. Минаев. Анализ и прогноз развития больших технических систем. – М.: Наука, 1982.
32. Э. Янч. Прогнозирование научно-технического прогресса. – М.: Прогресс, 1970.
33. В.Б. Булгак, Л.Е. Варакин, Ю.К. Ивашкевич, В.Д. Москвитин, В.Г. Осипов. Концепция развития связи Российской Федерации. – М.: Радио и связь, 1995.
34. Б.М. Теплов. Труды по психофизиологии индивидуальных различий. – М.: Наука, 2004.
35. В.Н. Вапник. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. – М.: Наука, 1979.
36. Алгоритмы и программы восстановления зависимостей. / Под редакцией В.Н. Вапника. – М.: Наука, 1984.
37. http://twitter.com/infonetics
38. А.А. Гоголь, В.Е. Джакония, О.В. Украинский. Новые возможности систем "сотового" телевидения. – ТелеМультиМедиа, №1, 2000.
39. http://www.levada.ru.
40. Л.Е. Варакин. Цифровой разрыв в глобальном информационном обществе. – М.: Международная Академия Связи, 2004.
41. Ю.В. Яковец. Циклы. Кризисы. Прогнозы. – М.: Наука, 1999.
42. Россия. Большая Российская Энциклопедия. – М.: издательство "Большая Российская Энциклопедия", 2004.
43. Л.Е. Варакин. Логистический закон развития с переменными параметрами. – Инфоком. Труды МАС, №1, 2005.
44. А.М. Половко, П.Н. Бутусов. Интерполяция. Методы и компьютерные технологии их реализации. – СПб.: BHV, 2004.
45. С. Бир. Кибернетика и управление производством. – М.: Наука, 1965.
46. Н.А. Соколов. Сети доступа в начале XXI века. – Сборник трудов второй всероссийской конференции "Абонентский доступ в сетях следующего поколения", СПб, 2005.
47. Т. Корн, Г. Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984.
48. И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.: Наука, 1986.
49. С.А. Саркисян. Прогнозирование развития больших систем. – М.: Статистика, 1975.
50. О.О. Замков, А.В. Толстопятенко, Ю.Н. Черемных. Математические методы в экономике. – М.: издательство "Дело и Сервис", 2004.
51. Ю.М. Коршунов. Математические основы кибернетики. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
52. Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов. Джокеры, русла или поиски третьей парадигмы. – "Знание – сила", 1998, №3.

Талантам нужно помогать,
Бездарности пробьются сами.
(Лев Озеров)

Приложение 5. Сценарии формирования ССП

Прогресс – это движение по
кругу, но все более быстрое.
(Л. Левинсон)

П5.1. Методологический подход к построению ССП

Выбор пути для создания ССП определяется множеством факторов. Среди них следует выделить методологический подход, используемый Оператором связи, так как он служит основой для программы модернизации существующей инфокоммуникационной системы. Можно назвать три основных варианта составления подобных программ [1].

Первый вариант – самый простой. Оператор решает текущие задачи. Например, в этом году необходимо заменить старую аналоговую АТС и подключить группу абонентов в новом микрорайоне. Через два года придется заменить еще одну аналоговую АТС, которая морально устареет, и так далее. В результате, к моменту полной модернизации телефонной сети сформируется структура ССП, которая практически повторит созданную ранее топологию.

Второй вариант предусматривает поиск оптимальной структуры сети к моменту полного завершения процесса создания ССП. Далее разрабатывается поэтапная программа построения такой сети. Основная задача Оператора заключается в строгом выполнении программы модернизации сети.

Третий вариант – компромиссное решение. Определяется оптимальная структура ССП, но программа ее модернизации не считается догмой. Периодически принятая программа корректируется с учетом изменяющихся внешних и внутренних факторов. Третий вариант формирования ССП представляется самым разумным. Правда, ему свойственны два основных недостатка. Во-первых, начальные инвестиции Оператора не будут минимальны. Сэкономить на первом этапе модернизации ГТС или СТС можно только при выборе первого варианта развития местной телефонной сети. Во-вторых, для задач планирования сети третий вариант – самый сложный. Тем не менее, его реализация приведет к минимальным суммарным затратам на построение ССП. По этой причине именно третий вариант составления программы построения ССП рассматривается далее как рекомендуемый методологический подход при модернизации ТФОП.

Реализацию структуры ССП, выбранной в качестве оптимальной, можно считать задачей, в которой известны начальные условия и ответ. Надо разработать методику, позволяющую получить известное решение рациональным способом. Эта методика – с учетом принятых ныне принципов построения местных телефонных сетей – должна быть приемлемой для четырех топологий. Каждый из четырех следующих разделов посвящен одной из таких топологий.

Разумный человек приспособляется к миру;
неразумный пытается приспособить мир к себе.
Поэтому прогресс всегда зависит от неразумных.
(Бернард Шоу)

П5.2. Модернизация телефонной сети без узлов

Значительная часть российских ГТС построена по принципу связи коммутационных станций "каждая с каждой". Ранее подобный способ организации межстанционных связей использовался при емкости ГТС до 80 тысяч номеров [2]. При использовании цифровых коммутационных станций рассматриваемая топология ГТС экономически целесообразна и

при большей емкости сети [1, 3]. В настоящее время ГТС без узлов созданы в ряде городов, которые обычно не имеют статус центра субъекта Федерации.

Для ГТС этого вида могут использоваться разные способы перехода к ССП. Тем не менее, следует разработать общий подход, содержащий базовые решения по созданию ССП. Для иллюстрации этих решений выбрана модель ГТС, показанная на рисунке П5.1. Она состоит из шести РАТС. Четвертая РАТС – комбинированная станция. Она выполняет также функции узла сельско-пригородной связи (УСП). Он необходим для связи с АМТС, обычно расположенной в центре субъекта Федерации. Предположим, что РАТС1, РАТС3 и РАТС4 – аналоговые коммутационные станции. Три оставшиеся РАТС относятся к поколению цифровых коммутационных станций.

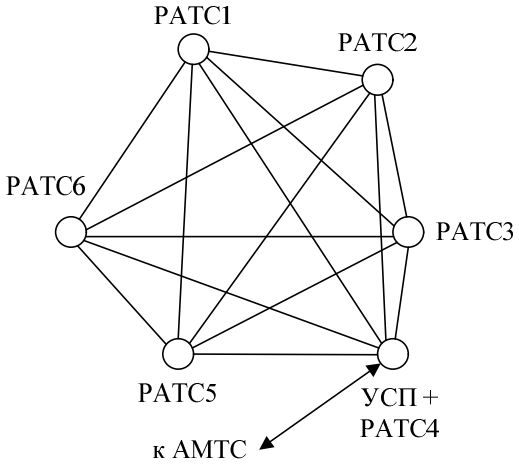


Рисунок П5.1. Модель ГТС без узлов

Множество всех возможных структур ССП для рассматриваемой модели невелико. Поэтому целесообразно использовать метод перебора всех допустимых решений, чтобы выбрать оптимальную структуру ССП. Принципы выбора оптимальной структуры ССП рассматриваются в третьей главе монографии. Структура ССП считается оптимальной, если предлагаемое решение соответствует выбранному критерию (например, минимуму объема инвестиций на реализацию проекта). Предполагается также, что для оптимального решения соблюдаются все заранее установленные ограничения. В результате проведенных исследований определены основные атрибуты сети. Их характерными примерами можно считать:

- численность узлов коммутации (включая шлюзы) различного назначения;
- места расположения этих узлов коммутации и их производительность;
- схему связи узлов коммутации между собой (структуру транспортной сети).

Допустим, что оптимальная структура ССП выбрана. Ее пример будет показан ниже – на рисунке П5.5. Хорошо известно [1, 4], что ССП целесообразно формировать с уровня сетей международной и междугородной связи. Поэтому далее предполагается, что вместо АМТС – до модернизации местной телефонной сети – будет установлен магистральный коммутатор (МК). Он будет обеспечивать транзит IP-пакетов, содержащих информацию любого вида (речь, данные и видео), в сетях междугородной и международной связи. Все названия узлов коммутации в ССП, используемые в монографии, выбраны мною по "своему вкусу". Несомненно, что необходима кропотливая работа по составлению перечня терминов для ССП. В противном случае мы, связисты, будем способствовать процессу перехода с русского языка на *олбанский*.

На рисунке П5.2 показан начальный этап модернизации ГТС. Этот рисунок (как и ряд следующих) состоит из двух плоскостей. Верхняя плоскость иллюстрирует основные изменения, касающиеся сети сигнализации. В нижней плоскости показана структура сети, по которой передается информация пользователей. Для ССП эта информация будет представлена в форме IP-пакетов. Для всех иллюстраций, состоящих из двух плоскостей, в ле-

вой части модели показан результат, который был получен на предыдущем этапе модернизации сети.

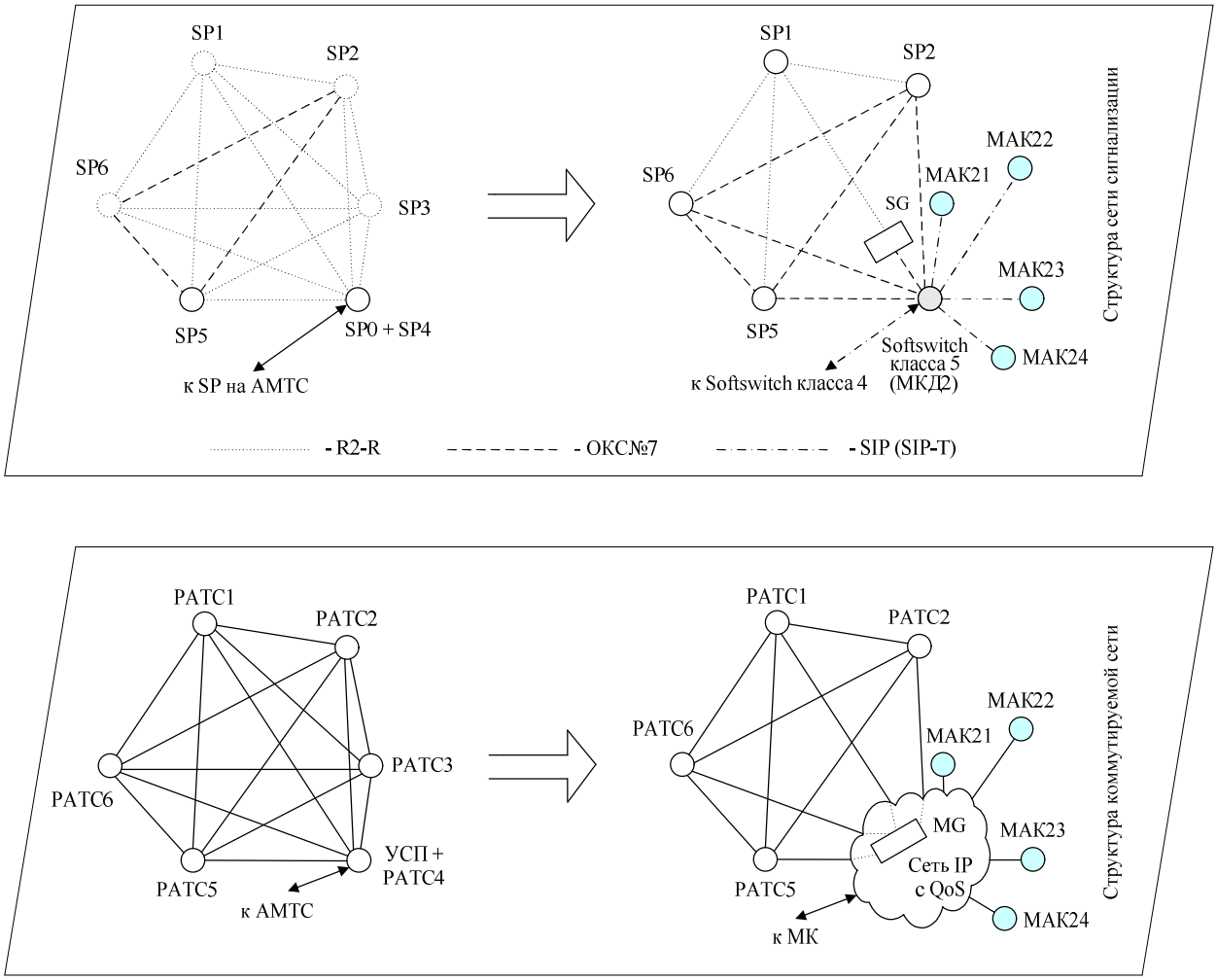


Рисунок П5.2. Первый этап модернизации ГТС без узлов

В городе начинает формироваться сеть IP, поддерживающая показатели качества обслуживания (QoS), которые определены для ССП. Перечень таких показателей должен быть установлен Администрацией связи. Основанием для нормирования показателей QoS должны служить рекомендации МСЭ и стандарты ETSI. На начальном этапе создания ССП в сети IP может использоваться всего один узел коммутации.

В нашем примере четыре концентратора МАК обеспечивают обслуживание всех абонентов, которые ранее были включены в РАТС3 и РАТС4. Выбор оптимального числа МАК – самостоятельная задача, для решения которой используются методы, изложенные в третьей главе монографии. В границах IP сети показан также транспортный шлюз MG (Media Gateway), который обеспечивает взаимодействие МАК с РАТС, использующими технологию "коммутация каналов".

В сети ССП необходим еще один элемент – мультисервисный коммутатор доступа (МКД). Он представляет собой Softswitch класса 5 [5, 6]. Пятый класс соответствует коммутационному оборудованию, которое функционирует на уровне местных сетей. Для анализа функций МКД необходимо обратиться к верхней плоскости второго рисунка, но прежде целесообразно привести краткие комментарии, касающиеся термина "Softswitch".

При разработке концепции ССП был введен термин MGC (Media Gateway Controller) – контроллер транспортного шлюза. Любой из вариантов перевода данного термина позволяет уяснить основные функции MGC. Известная компания Lucent Technologies присвоила своей разработке MGC фирменное название "Softswitch". Все, на первый взгляд правильные и простые, варианты перевода этого слова не позволяют уяснить функции

Softswitch. Тем не менее, именно этот, не самый удачный (по мнению ряда специалистов) термин, прижился в технической литературе.

Шесть РАТС, вне зависимости от типа используемого оборудования коммутации, можно рассматривать как пункты сигнализации – SP (signaling point). Такая трактовка была предложена МСЭ при разработке рекомендаций по системе общеканальной сигнализации. Номера SP и РАТС совпадают. Оборудованию УСП соответствует нулевой пункт сигнализации.

Основой сети сигнализации в ССП становится коммутатор Softswitch [5]. Его функции – к моменту завершения процесса модернизации ГТС – будут выполнять три МКД, что обеспечивает высокую надежность инфокоммуникационной системы. МКД поддерживает все протоколы сигнализации, необходимые и в ССП, и для взаимодействия с остающимися в эксплуатации РАТС. Эти РАТС могут использовать ОКС №7 или же систему сигнализации, принятую для электромеханических коммутационных станций. Для сигнализации на участках МАК – МКД, между МКД, а также между МКД и Softswitch класса 4 (который устанавливается на МК) предполагается использование протоколов SIP или SIP-T [6]. Допустимы также и другие решения, соответствующие международным стандартам.

Следует подчеркнуть, что для взаимодействия с аналоговыми РАТС необходим шлюз сигнализации SG (Signalling Gateway). Дело в том, что коммутаторы Softswitch не поддерживают процессы обмена сигналами управления и взаимодействия, которые используются в отечественных аналоговых коммутационных станциях. В составе ГТС (после завершения первого этапа ее модернизации) остается одна электромеханическая коммутационная станция – РАТС1. Система сигнализации, используемая российскими аналоговыми АТС, названа R2-R. Такое обозначение расшифровывается как российская версия системы сигнализации R2, принятой МСЭ (как, например, ISUP-R для ОКС№7). На сленге связистов известно также шуточное название R1,5.

В результате установки нового оборудования создается база для формирования ССП. В правой части нижней плоскости рассматриваемой модели показан только один маршрут между каждым МАК и сетью IP. Этот маршрут иллюстрирует логическую связь МАК с сетью IP. Для надежной связи обычно используются кольцевые топологии [7], которые обеспечивают включение каждого МАК в сеть IP по двум независимым путям – рисунок П5.3. Кольцо может быть образовано путем установки нового поколения оборудования SDH, ориентированного на требования ССП [8], или за счет применения систем передачи, в которых реализованы пакетные технологии. На рисунке П5.3 в качестве возможного решения изображено пакетное устойчивое кольцо RPR [9].

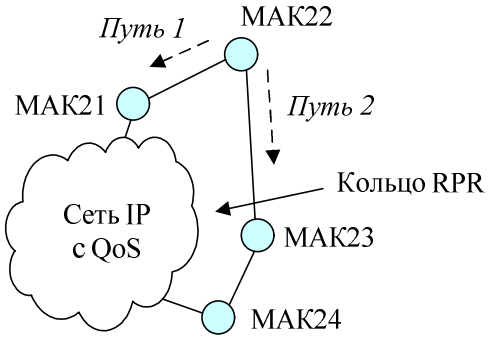


Рисунок П5.3. Два пути обмена информацией между МАК22 и IP сетью

На рисунке П5.4 показан один из возможных вариантов дальнейшего построения ССП. Он рассматривается как второй этап модернизации ГТС и основан на замене двух коммутационных станций: РАТС1 и РАТС2. Одновременная замена двух РАТС – одна из возможностей развития городской инфокоммуникационной системы. Принципы создания ССП не меняются и при замене одной РАТС на каждом этапе модернизации ГТС. В лю-

бом случае отправной точкой для выбора рационального решения служит вариант из заранее разработанной программы модернизации ГТС.

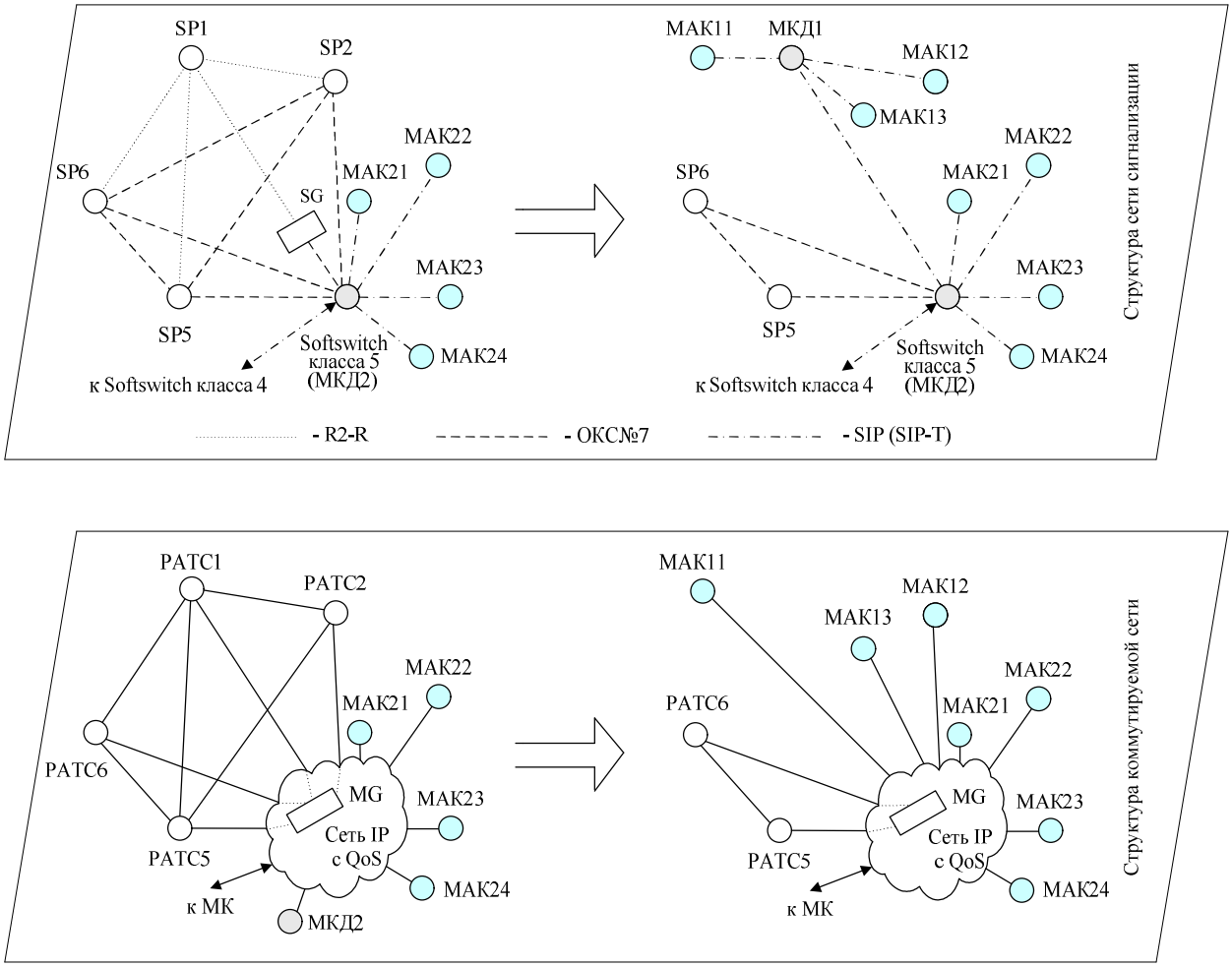


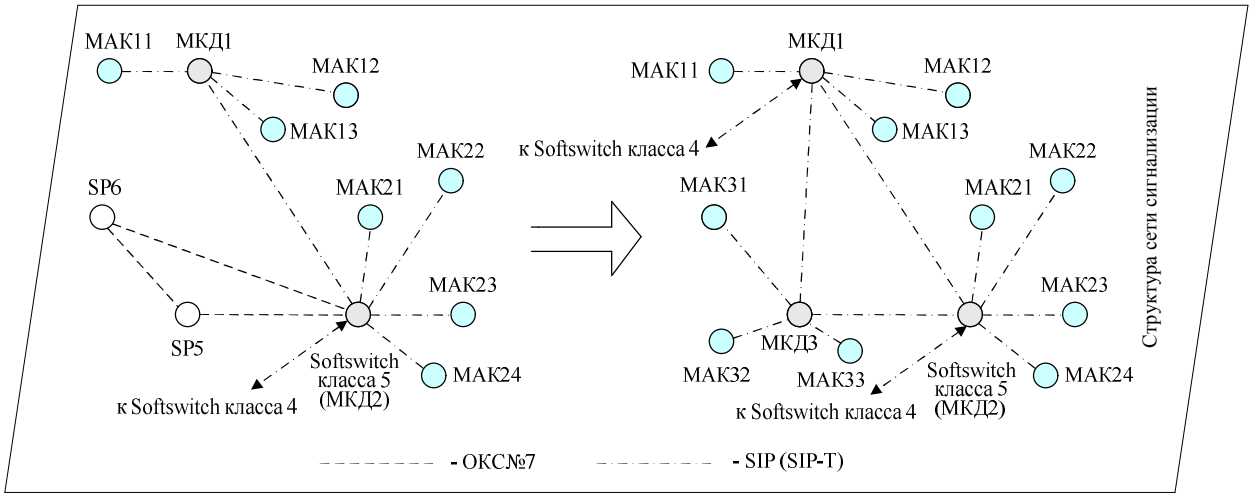
Рисунок П5.4. Второй этап модернизации ГТС без узлов

Установка МКД1 подразумевает реконструкцию сети доступа, в которой появляются еще три МАК. Между абонентами семи эксплуатируемых МАК все виды информации передаются в виде IP-пакетов. Управляют соединениями два МКД. Переход к технологии "коммутация каналов" необходим только для тех соединений, которые устанавливаются между телефонными аппаратами, включенными в РАТС5 или в РАТС6, и терминалами, обслуживаемыми концентраторами ССП.

Радикальные изменения происходят в сети сигнализации. Только в РАТС5 и РАТС6 используются системы сигнализации, реализованные для телефонной связи. Остальные элементы городской сети (МАК и МКД) взаимодействуют между собой по единой системе сигнализации, принятой для ССП.

Топология сети становится все более похожей на структуру ССП, формирование которой завершается на третьем – заключительном – этапе. Этот этап (рисунок П5.5) приводит к созданию сети со структурой, которая была выбрана заранее в качестве оптимального решения. Выбор структуры – предмет отдельного исследования, но его результат не влияет на изложенную выше методологию создания ССП. Предполагается, что все МКД должны быть связаны между собой для обеспечения высокой надежности системы сигнализации ССП. Кроме того, предусмотрена организация двух независимых направлений для обмена информацией с оборудованием Softswitch класса 4, который располагается в центре субъекта Федерации. Выход к этому Softswitch осуществляется через МКД1 и через МКД2. Такое решение гарантирует надежную связь городской сети ССП с верхними уровнями иерархии национальной инфокоммуникационной системы. Обеспечивается

также высокая надежность связи с другими сетями, если предусмотрены соответствующие функции взаимодействия.



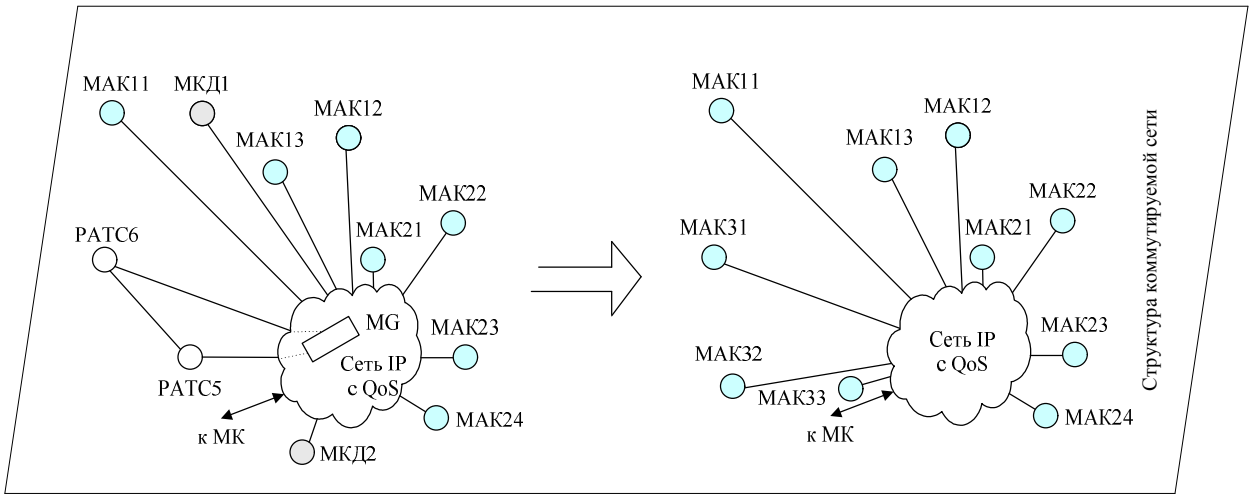


Рисунок П5.5. Третий этап модернизации ГТС без узлов

Варианты модернизации ГТС могут различаться темпами замены эксплуатируемого коммутационного оборудования, численностью МКД и МАК в IP сети, а также другими атрибутами. Это не влияет на принципы поэтапного создания ССП. Они универсальны. Необходимо упомянуть еще одну проблему – выбор тех технологий, которые необходимы для поддержки показателей QoS. Не умаляя актуальность решения задач подобного рода, следует отметить, что соответствующие затраты Оператора будут существенно меньше инвестиций, которые потребуются для замены всех РАТС и реализации современной сети доступа.

Прогресс – это лучшее,
а не только новое.
(Лопе де Вега)

П5.3. Модернизация телефонной сети с УВС

Некоторые российские ГТС построены как сети с узлами входящего сообщения (УВС). Ранее считалось, что такой принцип связи РАТС эффективен для сетей, емкость которых не превышает 800 тысяч номеров [2]. Для ГТС такой емкости использовался шестизначный план нумерации. Модель сети, использующей УВС, показана на рисунке П5.6. Каждый УВС образует узловой район [2]. Рассматриваемая модель состоит из двух узловых районов. В каждом районе установлены три РАТС. Обычно каждая РАТС связана с

АМТС пучками заказно-соединительных линий (ЗСЛ). На рисунке П5.6 пучки ЗСЛ показаны только для РАТС13 и РАТС23. Входящие соединения от АМТС к РАТС устанавливаются по СЛМ – соединительным линиям для междугородной связи. Пучки СЛМ включаются в узлы входящего сообщения для междугородной связи (УВСМ). Будем считать, что функции этих узлов выполняют УВС1 и УВС2. Предположим также, что первый узловой район построен на цифровом коммутационном оборудовании. УВС2 и все РАТС второго узлового района относятся к поколению аналоговых систем распределения информации.

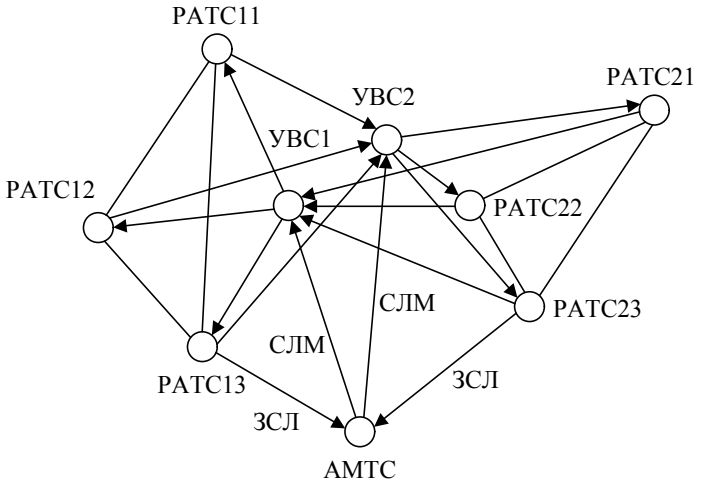


Рисунок П5.6. Модель ГТС с узлами входящего сообщения

Сети с УВС, как правило, создаются в городах, являющихся центрами субъектов Федерации. Принципы построения ТФОП предусматривают установку АМТС в центре каждого субъекта Федерации.

На первом этапе модернизации телефонной сети АМТС заменяется оборудованием МК или используется вместе с ним. Трафик речи, данных и видео в форме IP-пакетов передается через МК, а АМТС обслуживает телефонную нагрузку в режиме коммутации каналов. Сеть IP, поддерживающая нормированные показатели QoS при внутризоновой, междугородной или международной связи, передает пакеты через МК.

На первом этапе характер модернизации сети с УВС будет определяться числом заменяемых РАТС. Целесообразно выделить два варианта модернизации рассматриваемой структуры ГТС, которые заметно отличаются друг от друга. Вариант I подразумевает одновременную замену всех РАТС одного узлового района. Очевидно, что такое решение требует существенных разовых инвестиций, но обеспечивает простейший путь перехода к ССП. Для варианта II замена одной РАТС в узловом районе рассматривается как отдельный этап модернизации ГТС. Начальные затраты Оператора в этом случае будут минимальны, но процесс формирования ССП становится сложнее. По всей видимости, варианты I и II будут заметно различаться по суммарным затратам, необходимым для построения ССП. С этой точки зрения вариант I выглядит предпочтительнее.

На рисунке П5.7 показан вариант I для первого этапа модернизации сети с УВС. Нижняя плоскость иллюстрирует структуру городской сети, предназначенную для обмена информацией между терминалами пользователей. Изменения в системе сигнализации показаны в верхней плоскости рисунка П5.7. Поскольку коммутационное оборудование первого узлового района относится к современным системам распределения информации, замене подлежат УВС2 и обслуживаемые им аналоговые РАТС. Вместо трех аналоговых РАТС устанавливаются шесть концентраторов МАК. Эта величина выбрана условно. Методика определения оптимального числа концентраторов обсуждается в третьей главе монографии. Аналогично, сеть IP изображена в виде облака без уточнения количества используемых в ней узлов коммутации (маршрутизаторов).

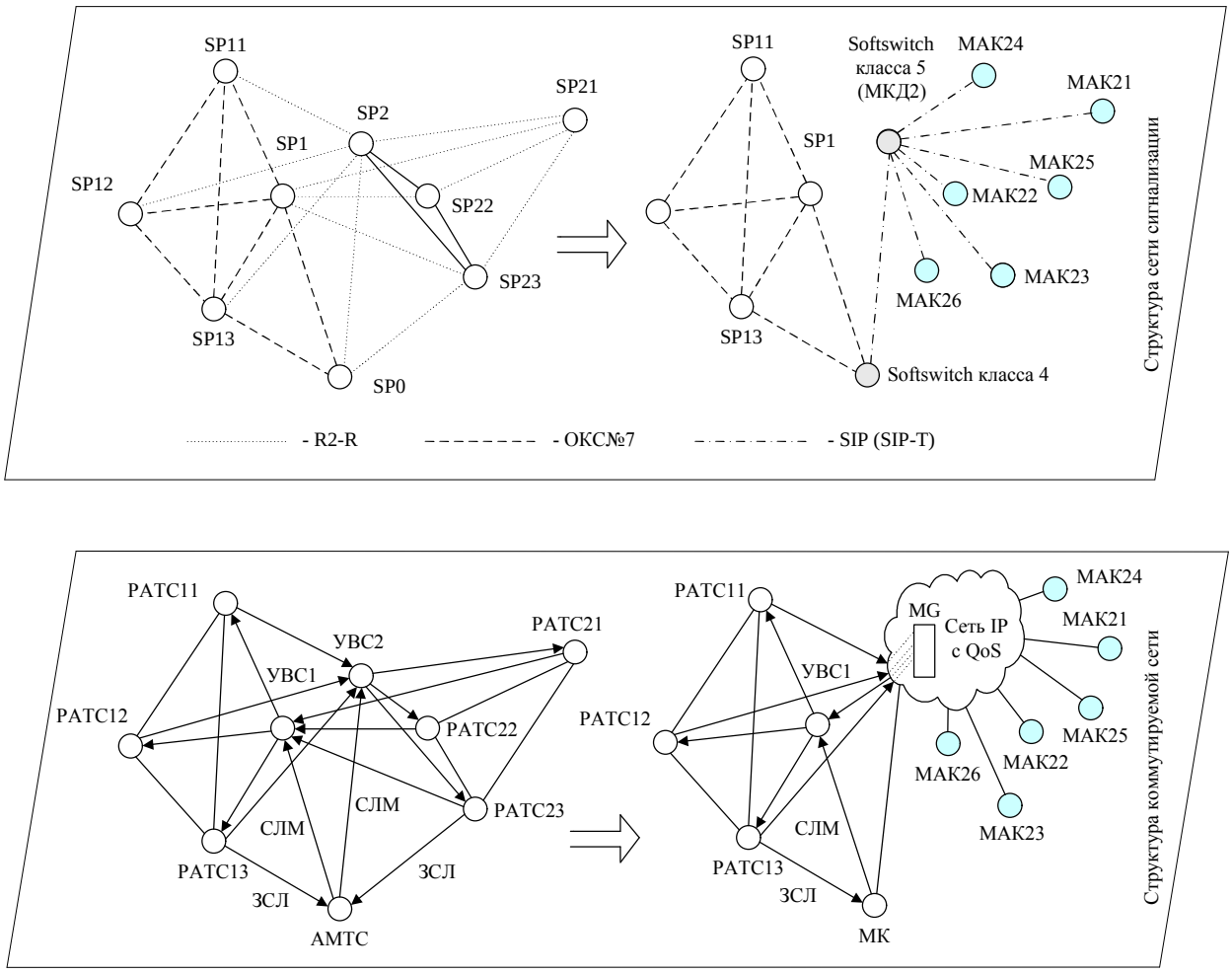


Рисунок П5.7. Первый этап модернизации ГТС с УВС. Вариант I

Между IP сетью и УВС1 должна быть создана линия передачи, обеспечивающая обслуживание входящего трафика ко всем РАТС первого узлового района. Никаких других изменений в составе той части ГТС, которая использует технологию "коммутация пакетов", не требуется. Обслуживание абонентов второго узлового района осуществляется шестью концентраторами, управляемыми МКД.

Для обеспечения функций взаимодействия между МАК и МКД используется протокол SIP (SIP-T). Этот же протокол применяется для связи МКД и Softswitch класса 4, который устанавливается вместе с МК. Обмен сигналами управления и взаимодействия между сетью IP и коммутационным оборудованием первого узлового района может осуществляться через Softswitch класса 4. Именно такая структура сети сигнализации показана в верхней части рисунка П5.7. Если ресурсы используемого Softswitch класса 4 не обеспечивают такую возможность, то необходимо устанавливать звенья сигнализации между SP1 и IP сетью.

Вариант II, представленный на рисунке П5.8, подразумевает замену только одной РАТС. Предполагается, что демонтируется РАТС23. Абоненты, которых обслуживала эта станция, переключаются в два концентратора – МАК21 и МАК22. Необходима установка МКД2, выполняющего функции Softswitch класса 5 и шлюза сигнализации GS, надобность в котором – при реализации варианта I – отсутствует. Шлюз MG должен иметь высокую пропускную способность, так как он обслуживает значительный трафик. Кроме того, данный шлюз, если проанализировать реальные характеристики эксплуатируемых ГТС с УВС, должен обеспечивать подключение большого числа пучков СЛ.

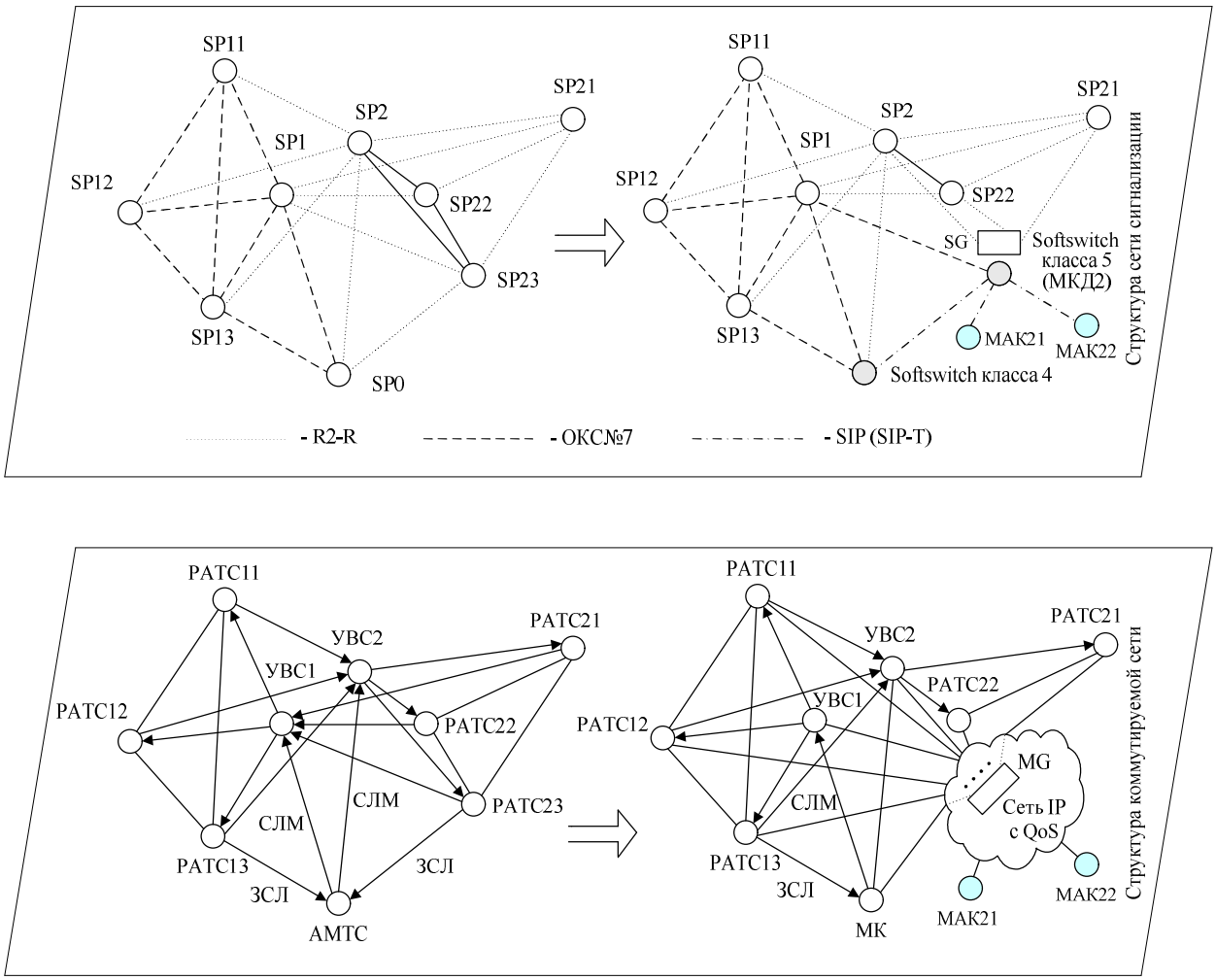


Рисунок П5.8. Первый этап модернизации ГТС с УВС. Вариант II

Второй этап для варианта II заключается в замене еще одной РАТС. Независимо от номера демонтируемой РАТС необходимо определить судьбу УВС2. Он может остаться как транзитный узел для последней электромеханической РАТС, эксплуатируемой в ГТС. Альтернативное решение заключается в демонтаже УВС2, что потребует переключения межстанционных связей последней аналоговой РАТС. Выбор решения для конкретной ситуации не представляет собой сложную задачу. В данном случае предполагается, что УВС2 сохранен для остающейся в эксплуатации РАТС22.

Демонтируемое оборудование РАТС23 может использоваться для расширения двух других аналоговых станций и узла, если это необходимо, или в качестве запасных частей узлов для ремонта эксплуатируемой аппаратуры. Процесс замены РАТС21 и РАТС22 может растянуться на неопределенное время. Поэтому некоторая часть демонтируемого оборудования может оказаться востребованной.

На рисунке П5.9 показана структура сети, образующаяся после замены аналоговой РАТС21 двумя концентраторами – МАК23 и МАК24. Оба концентратора включаются в сеть IP, что позволяет им поддерживать процессы обмена информацией любого рода в форме пакетов. Функции управления этими концентраторами возложены на МКД – Softswitch класса 5. МКД был установлен на первом этапе модернизации сети с УВС. Поэтому в плоскости, выделенной для сети сигнализации, не происходят столь же существенные изменения, которые характерны для нижнего фрагмента рассматриваемой модели.

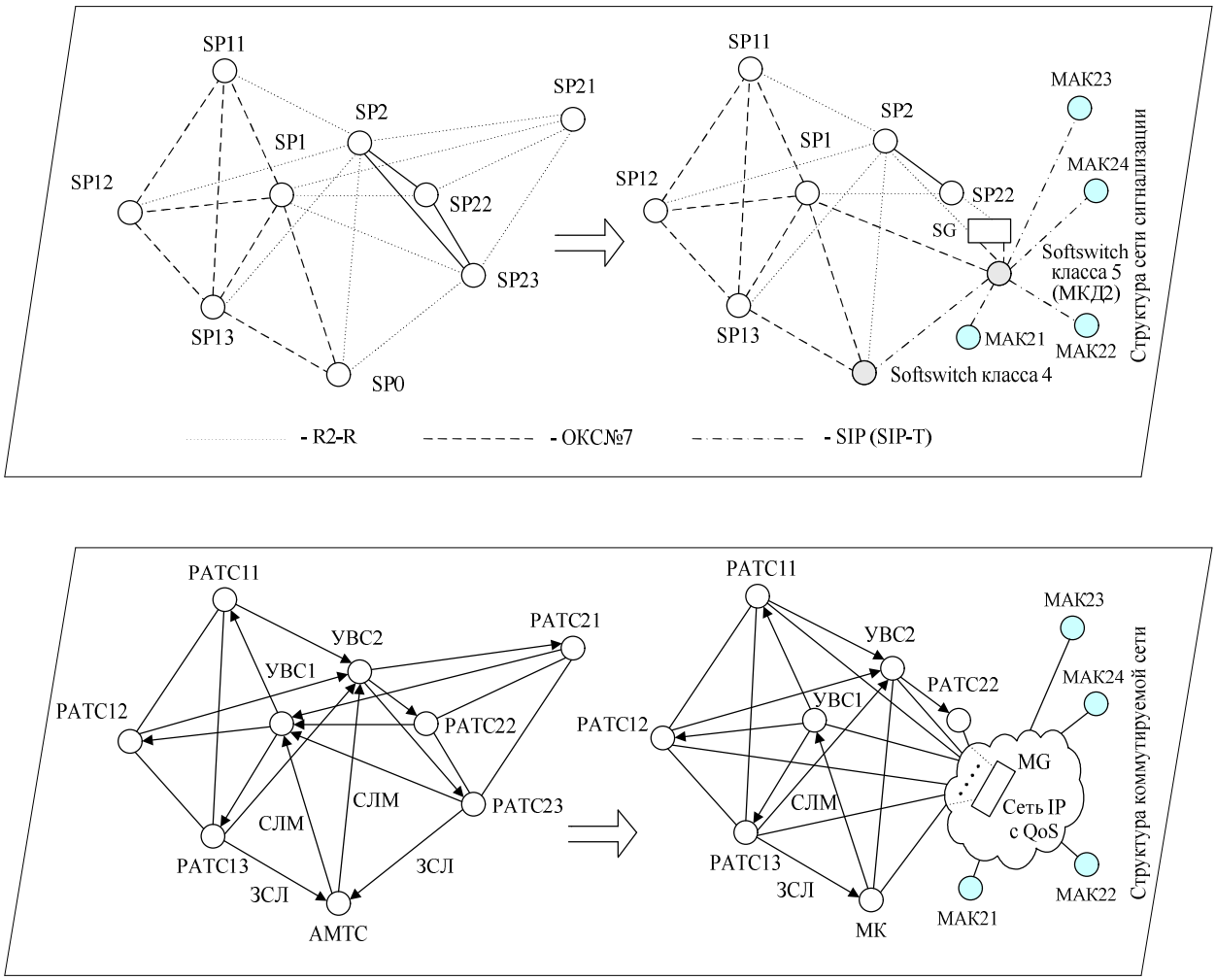


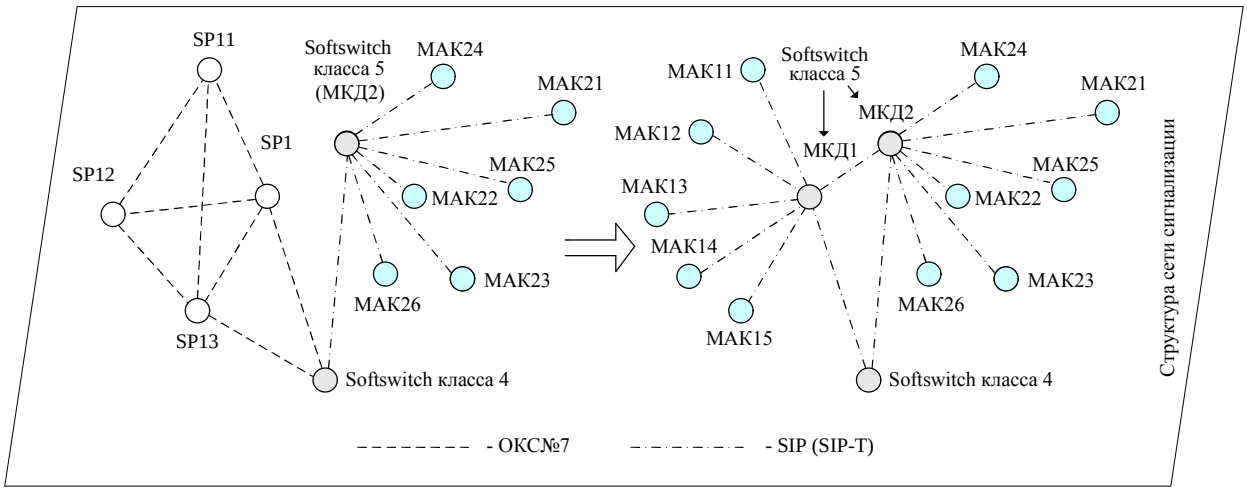
Рисунок П5.9. Второй этап модернизации ГТС с УВС. Вариант II

Следующий этап – замена РАТС22. В результате этой операции сформируется сеть, топология которой будет похожа на структуру, показанную на рисунке П5.7. Различия могут заключаться в количестве и в местах расположения оборудования МАК. Возможно, что будет другой и площадка, на которой разместится МКД2.

Не исключено, что процесс демонтажа аналоговых РАТС еще не закончится, а уже возникнет необходимость замены цифровых коммутационных станций. И в этом случае подход к формированию ССП остается неизменным.

Вернемся к рисунку П5.7, который фиксирует состояние процесса построения ССП, практически идентичное для вариантов I и II. Далее будут заменяться цифровые РАТС первого узлового района. Эта операция может быть одномоментной – вариант I. Другие решения подразумевают постепенную замену цифровых РАТС. Если на каждом этапе модернизации ГТС будет заменяться только одна цифровая РАТС, то процесс становится похожим на вариант II. Его анализ был приведен выше, а структуры сетей показаны на рисунках П5.8 и П5.9. Поэтому далее рассматривается вариант I, когда все три цифровые коммутационные станции заменяются одновременно, а УВС1 ликвидируется.

Структура ССП, образующаяся после замены всех тех РАТС, которые использовали технологию "коммутация каналов", представлена на рисунке П5.10. Численность МАК и МКД выбрана произвольно – по аналогии с рисунками из раздела П5.2 (ГТС без узлов). Все одиннадцать концентраторов связаны с сетью IP двумя независимыми трактами, как показано на рисунке П5.3. Такая возможность обеспечивается применением кольцевых топологий при построении транспортной сети. Связь всех коммутаторов Softswitch обоих классов (пятого и четвертого) по принципу "каждый с каждым" гарантирует надежность сети сигнализации.



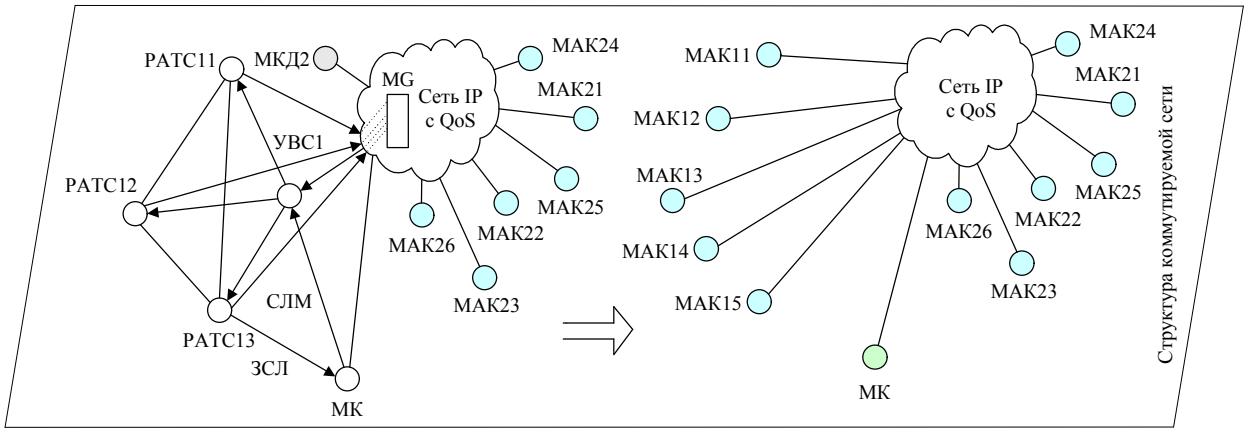


Рисунок П5.10. Заключительный этап модернизации ГТС с УВС. Варианты I и II

Правые нижние фрагменты рисунков П5.5 и П5.10 очень похожи. Это означает, что идеология ССП позволяет унифицировать структуру ГТС вне зависимости от ее емкости. Следует отметить, что и аппаратно-программным средствам, которые предназначены для построения ССП, также свойственна высокая степень унификации.

Прогресс начинается с веры в то,
что необходимое всегда возможно.
(Н. Казинс)

П5.4. Модернизация телефонной сети с УИС и УВС

Телефонные сети в крупных российских городах помимо УВС используют узлы исходящего сообщения (УИС). В некоторых случаях устанавливаются узлы исходящего и входящего сообщения (УИВС). Во всех российских ГТС с УИС и УВС или с УИВС местный номер абонента состоит из семи знаков. В тот период времени, когда основным коммутационным оборудованием были электромеханические АТС, переход к сетям с УИС и УВС становился неизбежным при емкости ГТС свыше 800 тысяч номеров [2]. На самом деле переход к сетям с УИС и УВС осуществлялся при меньшей емкости сети.

Модель сети, построенной с УИС и УВС, показана на рисунке П5.11. Она состоит из двух узловых районов. В каждом таком районе изображены три РАТС. В первом узловом районе все три РАТС связаны между собой через свои узлы. Все РАТС во втором узловом районе связаны между собой по принципу "каждая с каждой". Предполагается, что пучки ЗСЛ и СЛМ организованы между АМТС и УИС/УВС соответственно. В отличие от модели, рассмотренной в предыдущем разделе, не вводится никаких предположений о типах систем коммутации в обоих узловых районах.

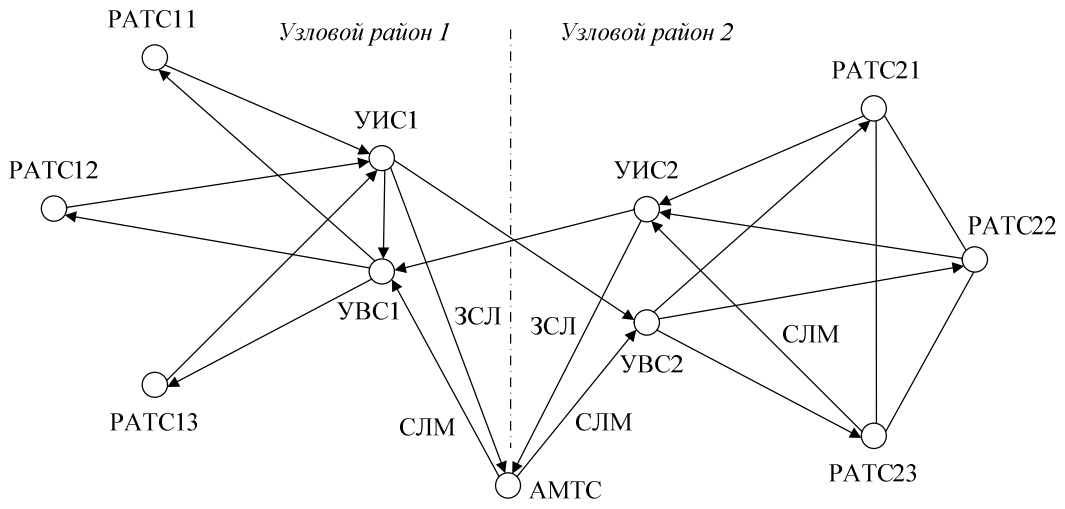


Рисунок П5.11. Модель ГТС с узлами исходящего и входящего сообщения

Формирование сети сигнализации при модернизации ГТС с УИС и УВС происходит по тем же принципам, которые были рассмотрены в разделах П5.2 и П5.3. Поэтому далее плоскость "структура сети сигнализации" в состав иллюстраций не включается. Основное внимание уделяется методологическому подходу к модернизации ГТС большой емкости. Вводится ряд предположений о формировании IP сети, поддерживающей показатели QoS.

Информация об основных характеристиках эксплуатируемой системы электросвязи и прогностические оценки спроса на новые инфокоммуникационные услуги позволяют определить оптимальную структуру ССП на момент завершения процесса модернизации ГТС. Модель такой структуры местной сети приведена на рисунке П5.12. Количество МАК и транзитных коммутаторов (ТК) в IP сети выбрано произвольно.

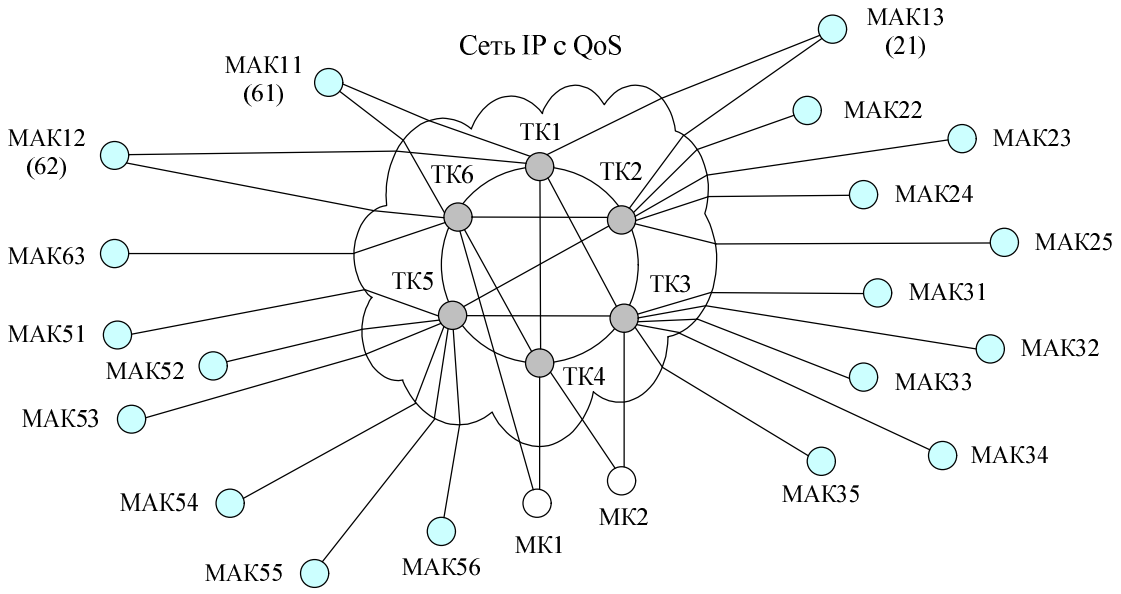


Рисунок П5.12. Модель оптимальной структуры ССП для крупного города

Каждый МАК включается в один их опорных коммутаторов двумя трактами, проходящими по независимым (в терминах теории надежности) путям. Принципы такого решения были показаны выше – на рисунке П5.3. Для некоторых МАК может оказаться необходимым включение в два опорных коммутатора (и даже более). На рисунке П5.12 такая возможность иллюстрируется для МАК11, МАК12 и МАК13. Для этих трех концентраторов в скобках указаны их "вторые" номера. Первая цифра "второго" номера указывает на тот ТК, в который МАК включен для повышения надежности связи.

Сеть IP в исследуемой модели состоит из шести ТК. Каждый ТК можно считать маршрутизатором. Задача ТК заключается в надежной передаче IP-пакетов в соответствии с заранее выбранным маршрутом. На рисунке П5.12 показана структура связи ТК между собой, близкая к полносвязному графу. Выбор оптимальной структуры связи между ТК – один из характерных примеров той группы задач, которые не входят в перечень вопросов, рассматриваемых в этом Приложении. В качестве другого примера можно назвать выбор структуры связи между ТК и МК. Для крупных городов будут устанавливаться два или более МК. Их связь с шестью ТК иллюстрирует очевидное требование: к каждому МК должны подходить тракты не менее чем из двух узлов IP сети. При этом каждый тракт между МК и ТК должен быть организован по двум независимым трассам. Пример такого решения – кольцевая структура, приведенная на рисунке П5.3.

Задача проектировщика заключается в поиске рациональных путей перехода от ГТС с узлами к сети ССП, оптимальная структура которой уже известна. На рисунке П5.13 приведена структура сети ССП, формируемой на первом этапе модернизации ГТС с УИС и УВС. Предполагается, что уже введен один МК и началось формирование IP сети. В обоих узловых районах заменяется по одной РАТС. На рисунке П5.13 показано также включение трех IP-УАТС. Слова "Вариант I" подчеркивают особенность рассматриваемой модели: УИС и УВС обоих узловых районов остаются в эксплуатации. В ряде случаев процесс формирования ССП целесообразно начинать с замены УИС и УВС. Подобный вариант эволюции ГТС – ему присвоен номер II – также будет рассмотрен.

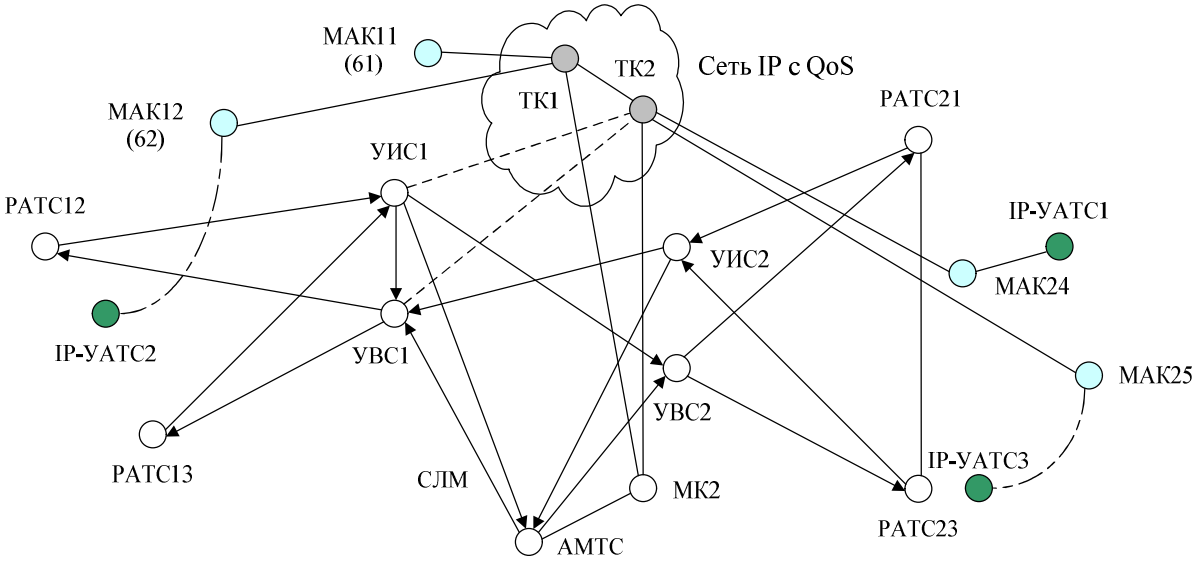


Рисунок П5.13. Первый этап модернизации сети с УИС и УВС. Вариант I

Абонентские терминалы, обслуживаемые ранее РАТС12 и РАТС21, переключаются в четыре концентратора. Предположим, что для их подключения в сеть IP необходимы два ТК. С их установки начинается процесс формирования IP сети с поддержкой показателей QoS. Оба транзитных коммутатора связаны с МК2, который, в свою очередь, обеспечивает обмен трафиком в форме IP-пакетов с ГТС и с сетями дальней связи через АМТС. Она должна, при необходимости, осуществлять переход на технологию "коммутация каналов". Магистральный коммутатор преобразует информацию, поступающую в него из АМТС по трактам Е1, в IP-пакеты для их последующей маршрутизации до соответствующего МАК.

Изменение технологии коммутации может осуществляться не только на участке АМТС – МК2. Пунктирными линиями показаны связи ТК2 с УИС1 и УВС2. Это означает, что для транзита местного трафика могут использоваться другие тракты. Выбор способа взаимодействия коммутационного оборудования с разными технологиями коммутации может быть сделан после сравнения затрат, которые необходимы для каждого возможного решения подобной задачи.

Первая IP-УАТС находится в зоне обслуживания МАК24. Задача проектировщика – выбрать трассу для связи этих двух элементов сети доступа и рассчитать пропускную способность тракта, обеспечивающего обмен IP-пакетами. Сложнее обстоит дело с двумя другими IP-УАТС. Они расположены вне зон обслуживания всех четырех МАК. Понятно, что включение IP-УАТС в РАТС нельзя считать разумным решением, так как ухудшаются показатели качества телефонной связи и возникает ряд сложных проблем с поддержкой многих современных услуг.

Целесообразно воспользоваться возможностью полупостоянной коммутации в МВК транспортной сети. Полупостоянные тракты на участках IP-УАТС2 – МАК12 и IP-УАТС3 – МАК25 изображены на рисунке П5.13 пунктирными линиями. По мере появления МАК вблизи этих IP-УАТС от полупостоянных соединений следует отказываться. При этом каждая IP-УАТС будет переключаться в ближайший к ней МАК.

На втором этапе модернизации ГТС с узлами двух типов происходит расширение IP сети и одновременное сокращение численности коммутационных станций, использующих технологию "коммутация каналов". На рисунке П5.14, иллюстрирующем этот процесс, показана ситуация после замены РАТС12 и РАТС21 несколькими концентраторами. В один из них переключается IP-УАТС2.

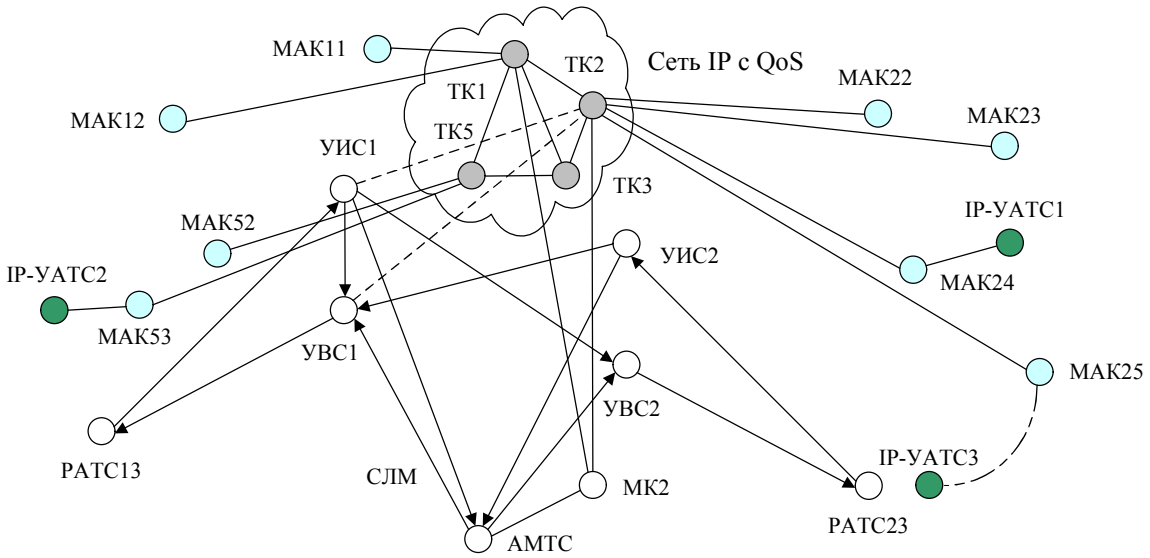


Рисунок П5.14. Второй этап модернизации сети с УИС и УВС. Вариант I

В каждом узловом районе остаются УИС и УВС, обслуживающие одну РАТС. На третьем этапе, который становится завершающим, выполняются следующие операции:

- заменяются все УИС и УВС, а также РАТС13 и РАТС23, то есть технология "коммутация каналов" в сети Оператора городской инфокоммуникационной системы более не используется;
- АМТС заменяется магистральным коммутатором (ему на рисунке П5.12 был присвоен первый номер);
- окончательно формируется сеть IP, в которой устанавливаются еще два ТК и создаются, при необходимости, дополнительные транспортные ресурсы;
- вводятся все предусмотренные в процессе планирования сети концентраторы, в один из которых переключается IP-УАТС3.

На рисунке П5.15 воспроизведена структура сформированной ССП. Она повторяет топологию, выбранную в качестве оптимальной (рисунок П5.12). Различие иллюстраций состоит в том, что ранее не были показаны три IP-УАТС, которые подключены к разным концентраторам.

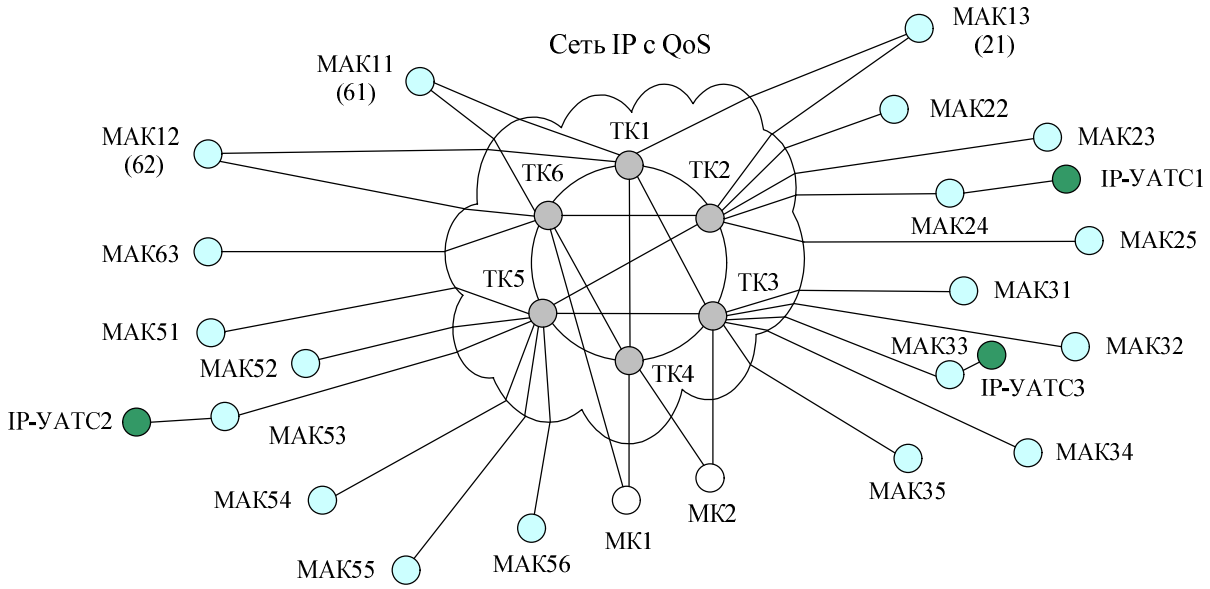


Рисунок П5.15. Структура ССП, создаваемая в результате модернизации ГТС

Второй вариант модернизации ГТС с узлами основан на превентивной замене УИС и УВС. Основные принципы такого пути формирования ССП иллюстрирует рисунок П5.16. Показан радикальный способ перехода к ССП – одновременная замена всех узлов, что подразумевает и установку двух МК вместо АМТС. Некоторые детали, идентичные для обоих вариантов, на рисунке П5.16 не показаны. Похожее решение рассматривается в работе [10], которая посвящена анализу возможных вариантов перехода киевской ГТС на пакетные технологии.

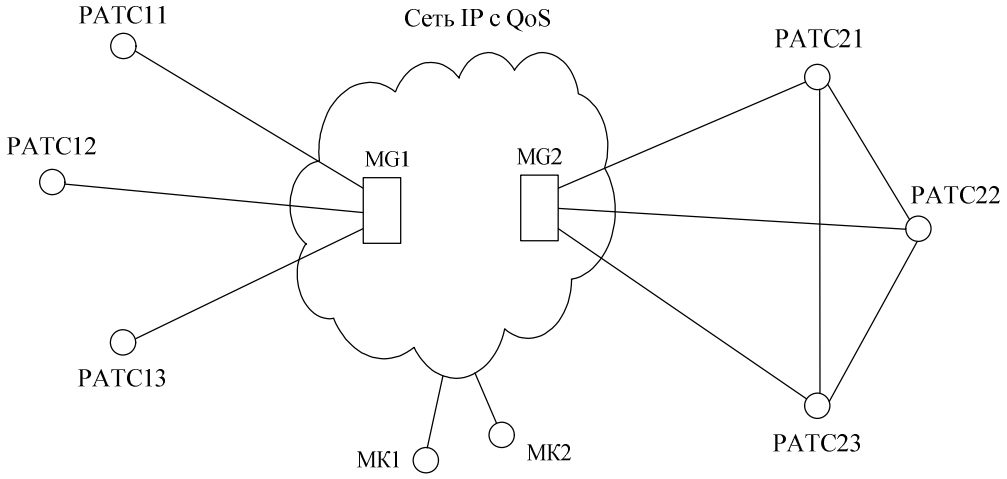


Рисунок П5.16. Первый этап модернизации сети с УИС и УВС. Вариант II

На первый взгляд вариант II выглядит предпочтительнее. К сожалению, подобные решения не всегда можно подкрепить экономическим обоснованием. Следует упомянуть три причины, существенно повышающие те затраты Оператора, которые необходимы на первом этапе модернизации ГТС:

- шлюзы MG, надобность в которых в перспективе отпадает, должны иметь высокую пропускную способность для обслуживания трафика, создаваемого всеми РАТС узлового района;
- IP сеть с поддержкой показателей QoS должна создаваться практически сразу из-за демонтажа узлов, использующих технологию "коммутация каналов";
- трафик, направляемый в сеть дальней связи, представлен в форме IP-пакетов, что определяет необходимость установки одновременно двух МК.

Важная положительная особенность варианта II заключается в возможности замены РАТС в течение длительного периода и с минимальными затратами. На рисунке П5.17 показан второй этап модернизации ГТС. Предполагается, что заменяются РАТС11 и РАТС23.

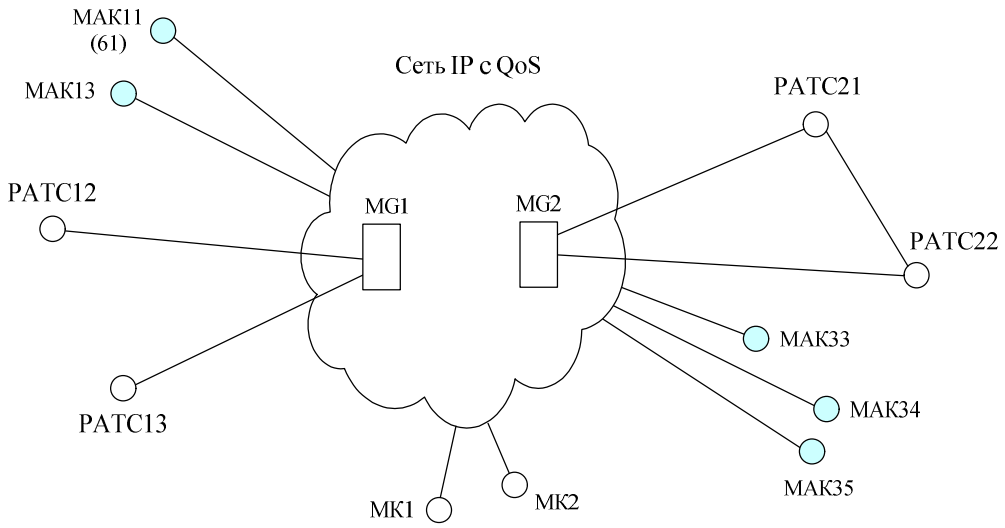


Рисунок П5.17. Второй этап модернизации сети с УИС и УВС. Вариант II

Постепенная замена всех остающихся РАТС концентраторами приведет к созданию ССП, структура которой была выбрана ранее в качестве оптимальной. Оператор получает возможность проведения более гибкой политики в отношении эксплуатируемых РАТС. В качестве обоснования этого утверждения можно привести еще один вариант создания ССП, похожий на идею построения выделенной сети. Безусловно, рассматриваемый ниже вариант (под третьим номером) возможен только при условии, что уже создана сеть IP с поддержкой показателей QoS. Основная идея варианта III показана на рисунке П5.18. Изображены две РАТС, для которых обслуживание определенной группы пользователей целесообразно перевести на технологию "коммутация пакетов".

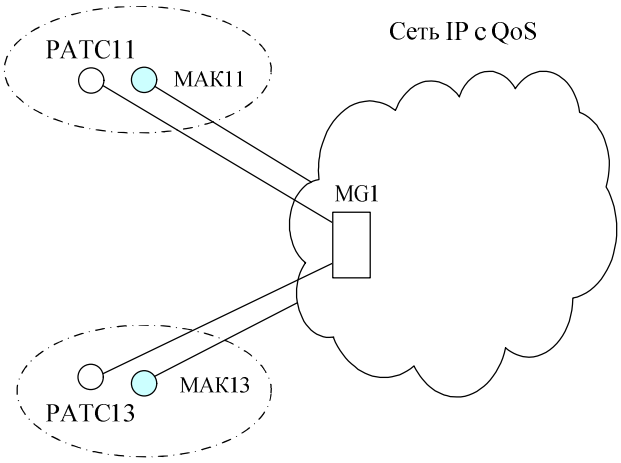


Рисунок П5.18. Модернизация сети с УИС и УВС. Вариант III

В помещении (чаще всего – в кроссе) каждой РАТС устанавливается концентратор, назначение которого состоит в подключении терминального оборудования пользователей, заинтересованных в иной технологии коммутации. Решение похоже на апробированную практику установки мульдексов DSLAM для организации высокоскоростного доступа с помощью оборудования ADSL. Не исключено, что при реализации варианта III замена значительной части РАТС (в частности, цифровых коммутационных станций) может стать

задачей на далекую перспективу. Это решение служит основой прагматического подхода к созданию ССП. Он подробнее рассматривается в шестом разделе данного Приложения.

Усовершенствовать можно
только самого себя.
(О. Хаксли)

П5.5. Модернизация сельской телефонной сети

Сценарии модернизации системы сельской телефонной связи можно представить при помощи модели, приведенной в левой верхней части рисунка П5.19. Следует отметить, что структура типичной российской СТС оставалась неизменной при смене нескольких поколений систем передачи и коммутации.

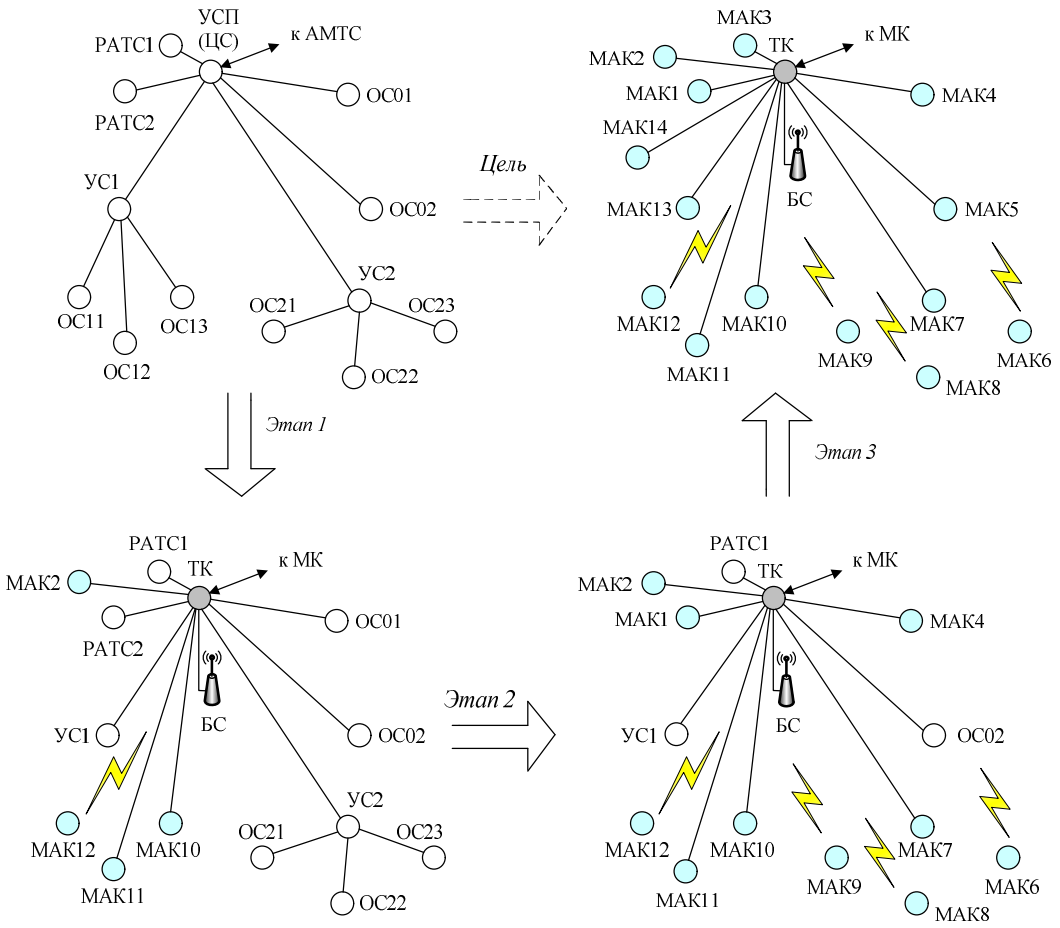


Рисунок П5.19. Типичный сценарий модернизации СТС

В административном центре каждого сельского района устанавливается УСП или центральная станция (ЦС). Они служат для подключения узловых (УС) и оконечных (ОС) станций к ТФОП. Общие функции ЦС и УСП – установление соединений между терминалами, включенными в разные УС и ОС, а также обеспечение связи с АМТС, которая расположена в центре субъекта Федерации. Различие УСП и ЦС заключается в том, что коммутационное оборудование ЦС содержит сеть доступа, а в УСП включаются только пучки СЛ. Похожее различие можно найти между УС и ОС. На самом деле УС представляет собой комбинированную АТС. В ней можно выделить ОС (коммутационное оборудование, обеспечивающее обслуживание абонентского трафика) и оборудование для транзита трафика. Это оборудование позволяет подключить "свою" и ряд других ОС к ЦС или УСП сельского административного района.

В центре сельского района создается ГТС. Она может состоять всего из одной ЦС, которая обслуживает трафик ГТС и СТС. В крупных районных центрах создаются ГТС, состоящие из нескольких РАТС. На рисунке П5.19 показан именно такой случай. РАТС1 и РАТС2 обслуживают абонентов ГТС районного центра. Две ОС включены в УСП (ЦС) непосредственно. Такой способ связи называется радиальным. Радиально-узловой способ подразумевает включение ОС через УС. На рисунке П5.19 такое решение показано для двух УС, каждая из которых обеспечивает обслуживание трех ОС.

Справа от рассматриваемой модели показана оптимальная структура ССП, которая должна быть создана в результате модернизации СТС. Введены такие предположения:

- для подключения пользователей, расположенных на территории районного центра, целесообразно установить три концентратора;
- связь четырех концентраторов с транзитным коммутатором районного центра следует реализовать за счет системы беспроводного доступа;
- целесообразно установить концентратор (МАК14) в том населенном пункте, где ранее не было коммутационной станции.

Теперь необходимо найти рациональную программу для достижения поставленной цели. На рисунке П5.19 выделено три этапа в решении поставленной задачи – переходу к ССП. Первый этап включает ряд первоочередных преобразований: появление МК на уровне междугородной сети и замена УСП (ЦС) транзитным коммутатором. На рисунке П5.19 не показана структура сети сигнализации и принципы ее развития. Положения, касающиеся сигнализации, будут изложены ниже – в комментариях к следующему рисунку.

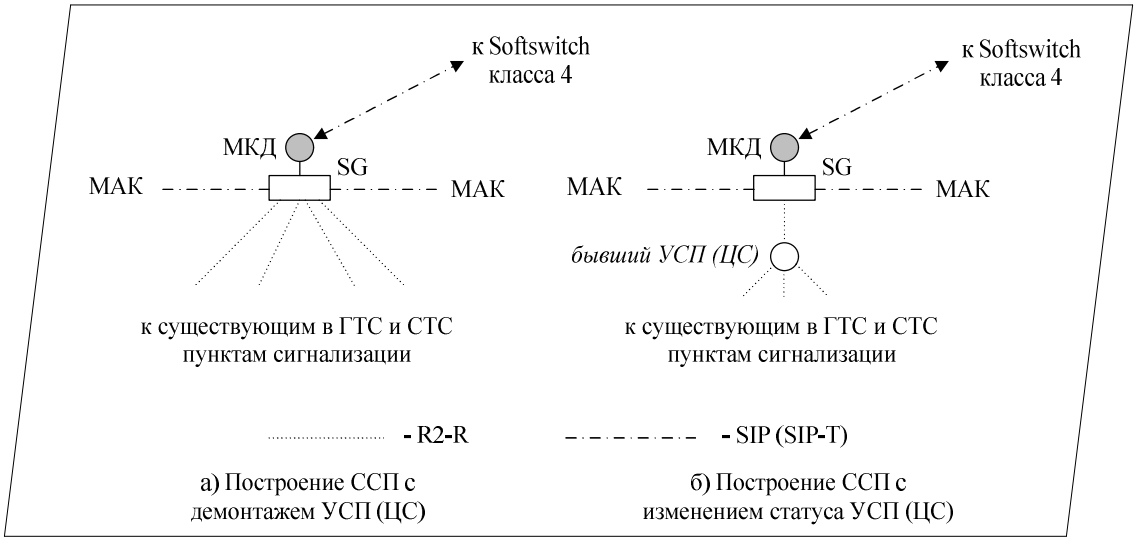
На первом этапе в ГТС районного центра и в СТС происходят следующие важные изменения:

- для включения группы пользователей вводится МАК2, поддерживающий, как и все одноименные концентраторы, обслуживание класса *triple-play service*;
- устанавливается оборудование беспроводного доступа (на рисунке показана связь базовой станции с транзитным коммутатором), которое на первом этапе было предназначено только для подключения МАК12;
- все ОС, включенные в УС1, демонтируются, а вместо них устанавливаются три концентратора (МАК10, МАК11 и МАК12).

После всех преобразований, запланированных на первом этапе модернизации СТС, формируется основа ССП. Следующие этапы эволюции системы сельской телефонной связи направлены на замену УС и ОС, основанных на технологии коммутации каналов. Кроме того, вводится концентратор в том населенном пункте, где ранее не было ОС. Радикальные изменения происходят с транспортными ресурсами для населенных пунктов, где ранее размещались ОС21, ОС22 и ОС23. Включение трех МАК, заменяющих эти ОС, предусмотрено за счет оборудования беспроводного доступа.

Структура сети к моменту завершения второго этапа модернизации СТС показана в правой нижней части рисунка П5.19. Из ранее установленного оборудования коммутации в эксплуатации остаются лишь РАТС1, УС1 и ОС02. Ресурсы беспроводного доступа после установки МАК6, МАК8 и МАК9 задействованы полностью. Задача Оператора на третьем (завершающем) этапе формирования ССП состоит в следующем. Необходимо заменить РАТС1, УС1 и ОС02, а также ввести в эксплуатацию МАК14. После проведения соответствующих работ поставленная цель будет достигнута: Оператор создаст сеть ССП, структура которой показана в правом верхнем углу рисунка П5.19.

Изменения в системе сигнализации в значительной мере определяются принципами модернизации телефонной сети районного центра. Два основных варианта формирования ССП на территории районного центра показаны на рисунке П5.20. Эта иллюстрация, как и несколько предыдущих, состоит из двух плоскостей, позволяющих разделить принципы построения сетей для передачи информации между терминалами пользователей и для сигнализации.



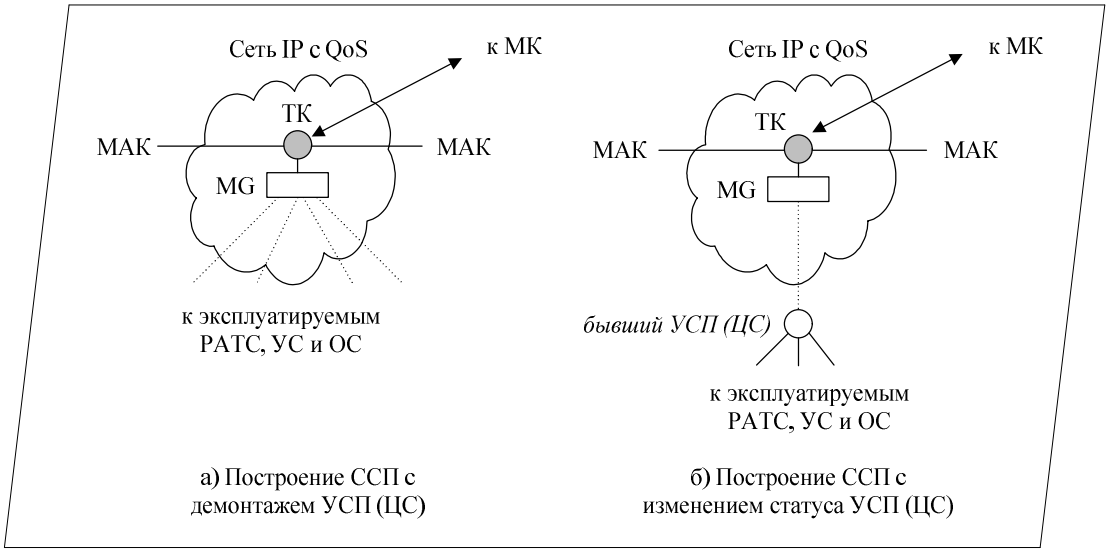


Рисунок П5.20. Два варианта модернизации телефонной сети районного центра

Вариант (а) предусматривает демонтаж УСП (ЦС), что требует переключения всех коммутационных станций в ТК. Эксплуатируемые АТС, которые используют технологию "коммутация каналов", подключаются к ТК через шлюз MG. Пропускная способность этого шлюза должна рассчитываться исходя из объема трафика, обрабатываемого всеми коммутационными станциями, которые подключены к шлюзу MG. Соответствующие изменения в сети сигнализации показаны в верхней плоскости рисунка П5.20. Очевидно, что производительность шлюза сигнализации SG должна вычисляться с учетом всех типов сообщений, которыми МКД обменивается с пунктами сигнализации, созданными в СТС и в ГТС районного центра.

Вариант (б) основан на изменении статуса УСП (ЦС). Новый статус оборудования коммутации этого уровня иерархии ближе всего к шлюзу. УСП (ЦС) в нижней плоскости модели можно рассматривать как шлюз, согласующий две технологии коммутации – каналов и пакетов. Этот шлюз позволяет применять аппаратно-программные средства MG всего с одним типом интерфейса и с небольшой пропускной способностью. Для верхней плоскости рассматриваемой модели оборудование УСП (ЦС) целесообразно трактовать как шлюз сигнализации. Он позволяет ограничить номенклатуру интерфейсов, которые должны поддерживаться аппаратно-программными средствами SG. Производительность шлюза SG будет меньше, чем величина, необходимая для реализации варианта (а).

Сельским районам в России и в ряде других стран свойственны заметные различия, касающиеся численности потенциальных пользователей и характера их расположения в

границах сети Оператора связи, размеров обслуживаемой территории, уровня спроса на инфокоммуникационные услуги, климатических условий, а также других факторов. Городам не присущи столь же существенные различия перечисленных выше атрибутов, весьма важных для инфокоммуникационной системы. Поэтому принципы модернизации развития системы сельской связи (учитывая и особенности отдаленных пунктов) требуют тщательной проработки. Этот вывод подтверждается активностью сектора развития МСЭ, а также ряда других международных и национальных организаций, занимающихся вопросами построения сетей электросвязи в сельской местности.

Спящего не буди, проснувшегося накорми.
(Восточная пословица)

П5.6. Прагматическая стратегия построения ССП

Анализ принципов перехода к ССП, выполненный последовательно для местных телефонных сетей разной структуры [11, 12, 13, 14, 15], основан на рациональных путях модернизации ТФОП за счет изменения технологий коммутации. Правомерна и другая постановка задачи: обеспечить подключение к ССП терминального оборудования тех абонентов, которые заинтересованы в новых видах обслуживания и готовы оплачивать предоставляемые услуги.

Такой подход обусловлен рядом особенностей российской инфокоммуникационной системы, среди которых следует выделить два аспекта, существенных с точки зрения перехода к ССП:

I. Темпы модернизации ТФОП остаются низкими. За двадцать пять лет, прошедшие с момента установки первой цифровой коммутационной станции в 1984 году, уровень цифровизации ТФОП достиг примерно 70%. Причем в мегаполисах этот показатель был ниже общероссийского. Следовательно, в ТФОП функционирует множество цифровых АТС, замена которых оборудованием ССП экономически нецелесообразна.

II. Спрос на современные инфокоммуникационные услуги для сравнительно малых (по численности) абонентских групп формируется очень быстро. Эти абонентские группы обычно распределены *по всей территории*, обслуживаемой местной телефонной сетью. При ожидаемых темпах создания ССП значительная часть абонентов, которая приносит Оператору существенные доходы, уйдет к конкурирующим компаниям.

Если объединить стратегии построения "наложенной" и выделенной сетей [1] под эгидой одного Оператора, то можно предложить еще один подход к развитию системы телефонной связи. Он может рассматриваться как прагматическая стратегия перехода к ССП. Эта стратегия позволит эффективно модернизировать ТФОП с учетом особенностей российской телекоммуникационной системы, перечисленных выше.

На рисунке П5.21 показан фрагмент ГТС, который состоит из двух АТС. Первая станция является цифровой, а вторая – аналоговой. Будем считать, что в границах зоны обслуживания первой АТС насчитывается K_1 абонентов, для которых интересны услуги, предоставляемые ССП. При этом, L_1 абонентов в таких услугах не нуждается. Очевидно, что в ближайшее время $L_1 >> K_1$. Аналогичная картина будет характерна для второй АТС, то есть $L_2 >> K_2$. В зданиях АТС устанавливаются концентраторы МАК. В первый и во второй МАК включаются K_1 и K_2 портов соответственно. Стык между МАК1 и АТС1 соответствует интерфейсу V5.2. Для сопряжения аналоговой АТС2 и МАК2 необходим конвертор (С). При переключении абонентских линий из АТС в МАК не меняется номер абонента в ТФОП, что привлекательно для многих пользователей, вложивших, например, значительные средства в рекламу своего номера.

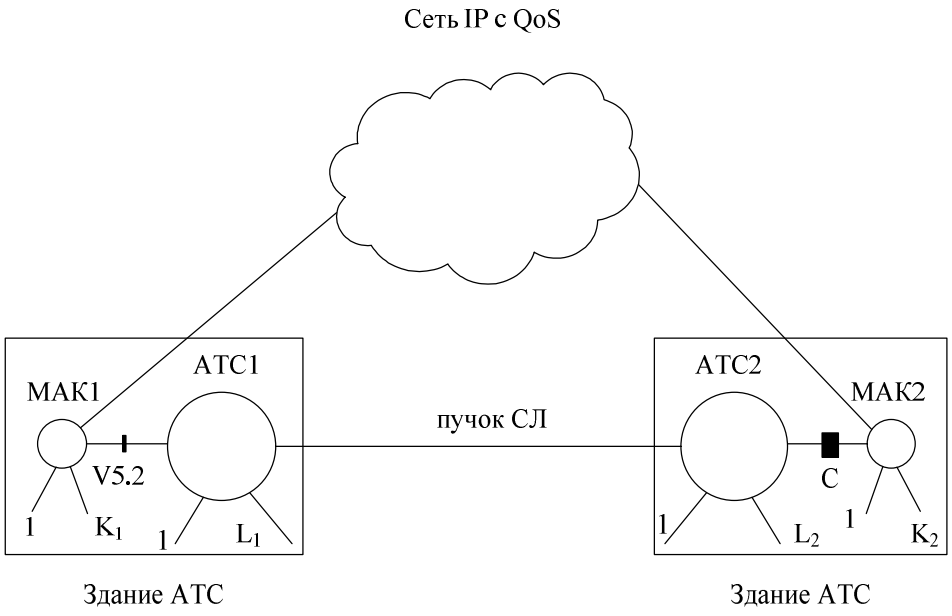


Рисунок П5.21. Прагматическая стратегия: начальный этап формирования ССП

Оба концентратора включаются в сеть IP, которая поддерживает все показатели QoS, специфицированные для ССП. Это означает, что всем абонентам, включенным в МАК, доступны услуги, которые входят в набор triple-play service.

Таким образом, оба МАК функционируют в двух сетях. Во-первых, они становятся концентраторами АТС. Во-вторых, они являются коммутаторами доступа в сети ССП. Для Оператора существенно то, что обе АТС могут использоваться до того времени, пока они удовлетворяют требованиям ТФОП, так как поддержка новых видов услуг возлагается на МАК. В ряде случаев для цифровых АТС отпадает и необходимость замены версий программного обеспечения, что позволяет Оператору экономить средства, которые были бы направлены на модернизацию сети.

Эволюция ТФОП заключается в постепенном росте величин K_j (числа абонентов, обслуживаемых аппаратно-программными средствами МАК). Это означает, что величина L_j (число эксплуатируемых портов в АТС) снижается. Процесс будет продолжаться до полного вывода АТС из коммерческой эксплуатации.

Построение выделенной сети ССП осуществляется в соответствии с идеологией "наложенной" сети, но с двумя существенными отличиями:

- выделенная сеть создается сразу для всех абонентских групп местной телефонной сети (на площадках эксплуатируемых РАТС);
- емкость каждого концентратора МАК на начальном этапе формирования ССП существенно меньше, чем емкость любого коммутатора ССП при реализации "наложенной" сети (такое же утверждение, как правило, будет справедливым для транспортных ресурсов на участке МАК – сеть IP).

Важная особенность прагматической стратегии перехода к ССП состоит в том, что учитывается различие спроса на новые инфокоммуникационные услуги и обеспечивается защита тех инвестиций, которые были сделаны (как правило, не так давно) в развитие цифровой ТФОП с коммутацией каналов.

Завершающая фаза модернизации ГТС показана на рисунке П5.22. Обмен пакетами между концентраторами осуществляется с использованием транспортного протокола реального времени (RTP).

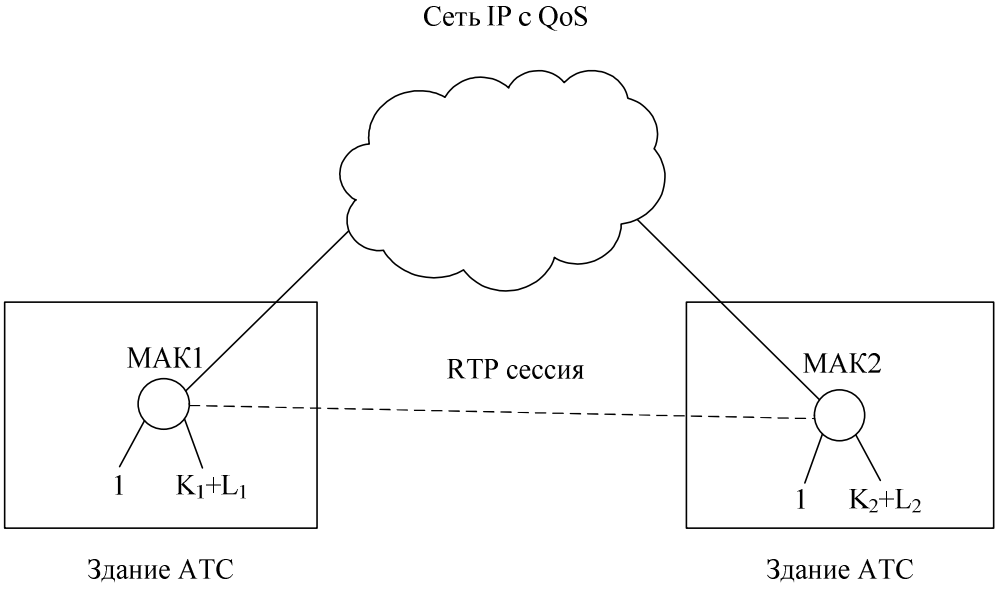


Рисунок П5.22. Прагматическая стратегия: завершающий этап формирования ССП

Наряду с очевидными преимуществами предлагаемого подхода к формированию ССП следует выделить ряд недостатков, свойственных прагматической стратегии. Они, как правило, объясняются экономическими соображениями, для изучения которых следует провести качественный анализ кривых чистой текущей стоимости – NPV [16] для стратегий перехода к ССП, интересных с практической точки зрения. Целесообразно рассмотреть три возможных выбора Оператора:

- организация "наложенной" сети;
- построение выделенной сети;
- реализация прагматической стратегии.

Построение выделенной сети рассматривается как отказ Оператора от поддержки услуг ССП. Оператор ограничивается основными и дополнительными услугами ТФОП. Известно, что эти услуги пока приносят самый большой доход Операторам связи.

Для построения кривых NPV и проведения качественного анализа результатов целесообразно ввести ряд предположений:

- во-первых, замена всех РАТС (если это необходимо в рассматриваемой стратегии) осуществляется в разное время;
- во-вторых, при завершении процесса реализации прагматической стратегии часть АТС может оставаться в эксплуатации и обслуживать трафик речи;
- в-третьих, количество этапов модернизации и те моменты времени, когда заменяется оборудование АТС, при построении "наложенной" и выделенной сетей совпадают.

Для рассматриваемых стратегий развития ТФОП предполагается, что начальное значение NPV (рисунок П5.23) равно нулю. Это не накладывает никаких ограничений на сравнительный анализ возможных путей эволюции телекоммуникационной системы. Для каждой $i-ой$ стратегии ($i=1,2,3$) в $j-ый$ момент времени – T_{ij} необходимы затраты, равные I_{ij}. Для всех стратегий на оси "Время" выбрана общая точка T_X. В этой точке на качественном уровне оценивается мера эффективности каждой стратегии. С этой целью вводится пара величин: значение NPV – D_i и риск – R_i. Между всеми точками на оси "Время" функция $NPV(t)$ считается линейной (некоторые авторы предпочитают иные формы представления результатов; в частности, применяются гистограммы, так как ряд финансовых показателей оценивается с заранее заданным периодом – месяц, квартал или год).

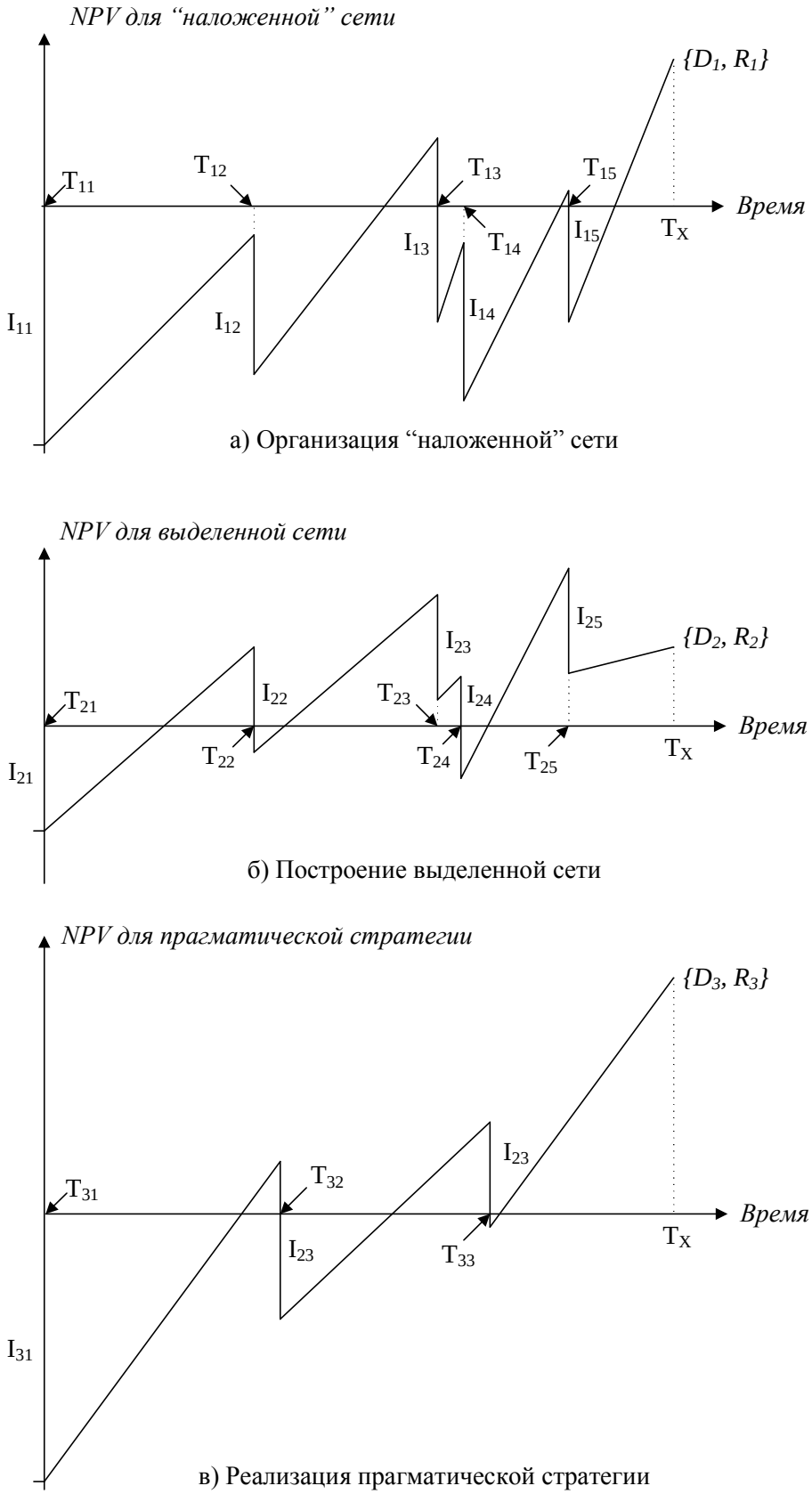


Рисунок П5.23. Поведение кривых *NPV* для трех стратегий развития ТФОП

При выборе Оператором стратегии "наложенная" сеть начальные инвестиции – I_{11} весьма существенны. Должна быть создана база IP сети. Кроме того, устанавливается один МАК вместо демонтируемой АТС. В принципе, абоненты, ранее включенные в демонтируемую АТС, могут обслуживаться за счет установки нескольких МАК, но это об-

стоятельство не столь существенно для анализа кривой NPV. К моменту времени T_{12} за счет доходов, получаемых от обслуживания абонентов, функция $NPV(t)$ возрастает. Для иллюстрируемой зависимости она приближается к нулю, но, конечно, возможны и положительные значения NPV. Далее необходимы инвестиции для замены второй АТС. Этот процесс продолжается вплоть до момента времени T_{15}, когда заменяется последняя АТС, а сеть IP реализуется в полном объеме.

Вторая стратегия подразумевает создание выделенной сети ССП некой новой компанией. Задачи Оператора, который ограничивает свой бизнес предоставлением абонентам основных и дополнительных услуг телефонной связи, известны. Он должен реализовать оптимальную структуру цифровой ГТС и минимизировать эксплуатационные расходы. Начальные инвестиции – I_{21} будут не столь существенными, как при выборе других стратегий развития ТФОП. Это утверждение справедливо и для других моментов времени T_{2j}. Более того, инвестиции в эти моменты времени будут примерно равными. Они необходимы для замены эксплуатируемых АТС новым оборудованием коммутации, которое обеспечивает, например, все виды современных услуг, предоставляемых за счет использования технологии коммутации каналов.

Прагматическая стратегия имеет важное конкурентоспособное преимущество: всем потенциальным клиентам могут быть предоставлены услуги ССП за счет переключения их линий доступа в МАК. Такая возможность требует сравнительно высоких начальных инвестиций. Необходимо обеспечить установку МАК (правда, с небольшой начальной емкостью) рядом с каждой действующей АТС, а также построить IP сеть, способную объединить все концентраторы. Последующие два этапа развития телекоммуникационной системы связаны с расширением емкости МАК и, при необходимости, с повышением пропускной способности IP сети.

Очевидно, что $I_{31} > I_{11} > I_{21}$. Можно ожидать, что в точке T_X будет справедливо похожее неравенство для величин NPV: $D_3 > D_1 > D_2$. Значения величин D_i оцениваются по результатам внедрения оборудования ССП. Сложнее оценить уровень риска, который свойственен каждой стратегии. Вторая стратегия, безусловно, ведет к стагнации, но время экономически выгодной эксплуатации сети, поддерживающей только услуги телефонной связи (точнее – те виды обслуживания, для которых достаточны коммутируемые соединения в полосе канала ТЧ) составляет, по всей видимости, не менее десяти лет. По этой причине данной стратегии развития ТФОП свойственен минимальный риск, то есть $R_2 < R_1$ и $R_2 < R_3$. Для оценки соотношения между величинами R_i был использован метод экспертных оценок. Результаты опроса приведены в таблице П5.1.

Таблица П5.1

Величина R_1		Величина R_2		Величина R_3	
$R_1^{(1)}$	ν_1	$R_2^{(1)}$	ν_2	$R_3^{(1)}$	C_3
0,81	0,25	0,40	0,59	0,35	0,69

Рассчитаны как средние значения исследуемых величин – $R_i^{(1)}$, так и коэффициенты вариации – ν_i. Средние значения риска определялись в диапазоне от нуля до единицы, что позволяет использовать методы теории вероятностей для анализа альтернативных направлений развития ТФОП.

Оценки, приведенные в таблице П5.1, позволяют сделать несколько очень полезных выводов. Во-первых, практически все участники опроса считают, что отказ Оператора телефонной сети от поддержки – в перспективе – мультисервисных услуг связан с очень высоким риском. Важно то, что эксперты единодушны. Об этом свидетельствует низкий коэффициент вариации величины R_1. Во-вторых, стратегии модернизации ТФОП, которая

была названа в этой работе прагматической, свойственен минимальный риск (по оценке участников опроса). Уровень риска меньше, чем у стратегии, которая основана на постепенной замене АТС коммутационным оборудованием ССП. В-третьих, расхождение мнений экспертов по численной оценке риска прагматической стратегии модернизации ТФОП весьма существенно. Это предопределяет необходимость дальнейшего изучения предлагаемых решений и проведение повторного опроса после ознакомления всех его участников с полученными результатами.

Прагматическую стратегию перехода от ТФОП к ССП не следует рассматривать в качестве универсального решения Оператора. Тем не менее, она представляется весьма продуктивной для большинства местных телефонных сетей. По всей видимости, самый существенный эффект ее реализация принесет Операторам, которые добились высокого уровня цифровизации местных телефонных сетей.

Важно отметить одну проблему прагматической стратегии перехода от ТФОП к ССП: что делать с АТС, устаревшей морально или физически? Предположим, что группа абонентов, обслуживаемых МАК, практически не растет. Остальным абонентам вполне достаточны услуги цифровой АТС. Эти проблемы требуют отдельного изучения, хотя логичный вывод – замена демонтируемой АТС оборудованием ССП.

Audiatur et altera pars.
(Да будет выслушана и другая сторона)

П5.7. Концепция "Расширяющееся ядро"

Соображения, изложенные в предыдущих разделах, касаются задач модернизации местных сетей. Нормированные показатели качества обслуживания трафика в ССП могут быть обеспечены только в том случае, если корректно определены принципы перехода на новую технологию коммутации в сетях междугородной и международной связи.

В зарубежных публикациях, посвященных системным вопросам модернизации ТФОП, предполагается, что процесс перехода к коммутации пакетов междугородной телефонной сети осуществляется превентивно [17, 18]. Это означает, что программы развития ТФОП на разных уровнях иерархии должны быть тщательно согласованы.

Следует подчеркнуть, что предыдущий этап качественной модернизации ТФОП, который был основан на установке цифрового коммутационного оборудования, требовал соблюдения ряда новых (для эксплуатируемой системы связи) принципов. Однако данные принципы [1, 19] не требовали согласования стратегии развития ТФОП на всех уровнях ее иерархии. Правда, скоординированная техническая политика обещала ряд преимуществ технического и экономического характера. Тем не менее, соответствующие решения не ухудшали достигнутые показатели качества обслуживания трафика речи. К сожалению, пакетные технологии несут в себе скрытую угрозу снижения качества телефонной связи, что подтверждает зарубежный опыт [20].

Рассмотрим рисунок П5.24. На нем затемненными квадратиками отмечен ряд типичных мест, в которых изменяется технология коммутации в процессе постепенного перехода к ССП. Центральный фрагмент рассматриваемой модели (он далее называется "ядром") включает в себя и внутризоновые сети. В большинстве стран они входят в состав сети междугородной связи.

На начальном этапе формирования ССП пакетные технологии используются только в "ядре" сети. Это значит, что в первую очередь должна быть создана междугородная IP сеть. Стоимость подобного проекта в значительной мере определяется размерами страны. Некоторые государства уже полностью создали IP сети на уровне междугородной связи. В частности, в средствах массовой информации сообщалось, что такой проект еще в начале XXI века был реализован в Италии.

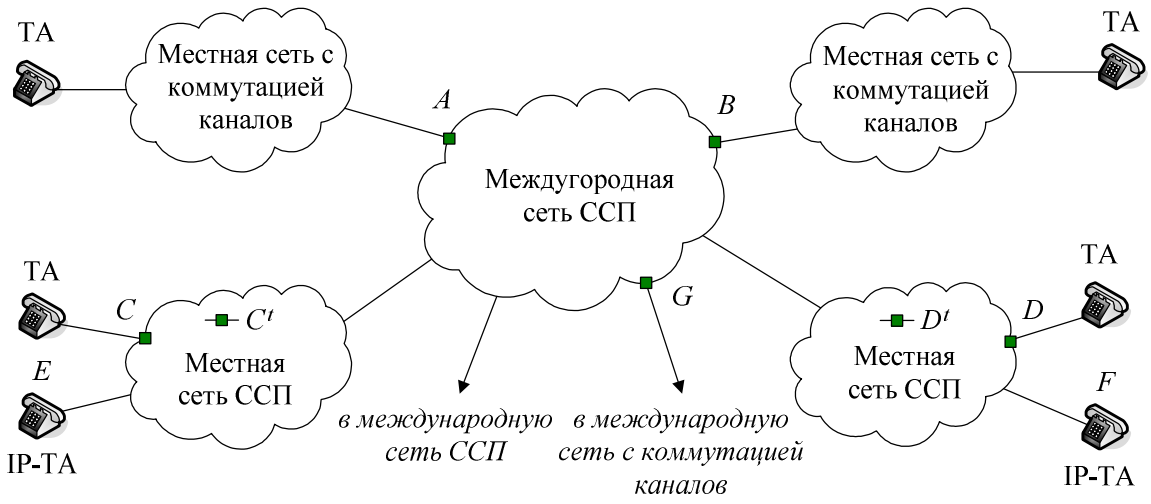


Рисунок П5.24. Построение ССП на основе концепции "Расширяющееся ядро"

При модернизации ГТС и СТС пакетные технологии начинают применяться уже за пределами сети междугородной связи. Данный процесс целесообразно рассматривать как расширение "ядра". Эта аналогия породила название концепции – *"Расширяющееся ядро"*.

При установлении соединения между телефонными аппаратами двух местных сетей с коммутацией каналов преобразование технологии коммутации осуществляется в точках A и B. Они расположены на границах междугородной сети ССП. Классический подход к построению ССП основан на том, что интерфейсы в точках A и B будут задействованы раньше, чем в других компонентах инфокоммуникационной системы.

При модернизации местных сетей преобразование технологии коммутации будет выполняться в разных точках. Если абонент использует обычный терминал, то эта функция выполняется в точках C и D. Для IP телефона (IP-ТА) эти точки (E и F) будут расположены в терминале. В обоих случаях технология "коммутация каналов" уже не используется для установления местных и междугородных соединений.

Процесс перехода к ССП на уровне местных сетей будет длительным. По этой причине в местных сетях в период времени $\left(T_{ТФОП}, T_{ССП}\right)$ будут сосуществовать обе технологии коммутации – каналов и пакетов. Для момента времени t – при условии, что $T_{ТФОП} < t < T_{ССП}$ – точки C и D будут размещаться в границах местной сети. На рисунке П5.24 такие точки обозначены как C^t и D^t. Они помещены в границах соответствующих местных сетей ССП.

При международной связи могут устанавливаться соединения с сетями, в которых используются два вида технологии коммутации – каналов и пакетов. В первом случае смена технологий коммутации осуществляется в точке G. Во втором случае граница IP домена располагается в национальной сети другой страны. Для обеспечения высоких показателей качества обслуживания трафика было бы целесообразно начинать процесс перехода к ССП одновременно на уровнях международной и междугородной связи. Различия технического и экономического характера, свойственные национальным инфокоммуникационным системам, не позволяют считать такое решение выполнимым в реальных условиях.

Определите значения слов – и вы избавите
человечество от половины его заблуждений.
(Р. Декарт)

П5.8. Несколько замечаний по рисункам и по терминологии

В этом Приложении использованы иллюстрации, в которых ряд схем организации связи представлен в упрощенном виде. Такое решение было принято с единственной це-

лью: не загромождать рисунки. Более корректные структуры местных телефонных сетей приведены, например, в учебнике [21].

Второе замечание касается терминологии. В этом Приложении (как, впрочем, и в тексте всей монографии) я старался избежать сложных проблем разработки терминологии. Система понятий, которую необходимо создать в ближайшее время, должна основываться на совокупности компромиссных решений. Во-первых, необходимо добиться понимания между специалистами по телефонии и передаче данных. Именно это обстоятельство было главным при выборе терминов, используемых в монографии. В-вторых, целесообразно привести российскую терминологию в соответствие с определениями, принятыми в материалах МСЭ. Для решения данной задачи целесообразно воспользоваться словарем терминов, который размещен на официальном сайте МСЭ – http://www.itu.int.

Литература к Приложению 5

1. Н.А. Соколов. Телекоммуникационные сети. – М.: Альварес Паблишинг, 2004.
2. И.М. Жданов, Е.И. Кучерявый. Построение городских телефонных сетей. – М.: Связь, 1972.
3. R. A. Thompson. Telephone Switching Systems. – Artech House, Boston, London, 2000.
4. N. Wilkinson. Next Generation Network Services. Technologies and Strategies. – John Wiley & Sons, Ltd., 2002.
5. А.Б. Гольдштейн, Б.С. Гольдштейн. – СПб.: "БХВ – Санкт-Петербург", 2006.
6. А.Б. Гольдштейн, В.В. Саморезов. Softswitch: сегодня и в перспективе. – Специальный выпуск "АТС-2005", Технологии и средства связи, 2005.
7. В.В. Калмыков, А.М. Меккель, Н.А. Соколов, Ю.С. Шинаков. Транспорт и доступ в инфокоммуникационных сетях. – М.: МАС, 2006.
8. А.М. Меккель. Перспективы развития магистральных транспортных сетей. – Информ Курьер Связь, 2005, №6.
9. А.М. Горнак. Услуги, технологии и стандарты городских сетей класса Ethernet. – Документальная электросвязь, январь 2005.
10. Г. Балькин, В. Михайлов, В. Москалец, В. Хиленко. Киевская городская сеть: переход на пакеты. – Сети и телекоммуникации, №1-2, 2004.
11. А.В. Пинчук, Н.А. Соколов. Модернизация ГТС без узлов. – Вестник связи, 2005, №12.
12. А.В. Пинчук, Н.А. Соколов. Модернизация ГТС с узлами входящего сообщения. – Вестник связи, 2006, №1.
13. А.В. Пинчук, Н.А. Соколов. Модернизация ГТС с узлами исходящего и входящего сообщения. – Вестник связи, 2006, №3.
14. А.В. Пинчук, Н.А. Соколов. Модернизация сельских телефонных сетей. – Вестник связи, 2006, №4.
15. А.В. Пинчук, Н.А. Соколов. Прагматическая стратегия перехода к NGN. – Вестник связи, 2006, №6.
16. И.М. Лифиц. Теория и практика оценки конкурентоспособности товаров и услуг. – М.: "Юрайт", 2001.
17. U. Olsson. Towards the all-IP vision. – Ericsson Review, 2005, №1, Vol. 82.
18. P. Darling. Telstra's "Next Generation Network" – Telecommunications Journal of Australia, Vol. 56, No 1, 2006.
19. М.Ф. Лутов, М.А. Жарков, П.А. Юнаков. Квазиэлектронные и электронные АТС. – М.: Радио и связь, 1988.
20. O. Taaffe. The move from capacity to capability. – Telecommunications International, December, 2005.
21. Б.С. Гольдштейн, Н.А. Соколов, Г.Г. Яновский. Сети связи. – СПб.: БХВ, 2010.

Все преходяще, быстротечно,
И лишь наука долговечна.
(Себастьян Брант)

Приложение 6. Методы расчета однолинейных СМО

Ключом ко всякой науке
является вопросительный знак.
(Оноре де Бальзак)

П6.1. Исследуемые характеристики 1

Теория массового обслуживания изучает различные характеристики СМО. Их общая численность для сложных систем может быть весьма существенной. В этом Приложении рассматриваются два вида характеристик однолинейных СМО. Первый из них связан с двумя показателями качества обслуживания, используемыми в качестве общепринятых норм. Речь идет о среднем значении длительности задержки IP-пакетов и квантиле соответствующей ФР. Поэтому необходимо найти математическое ожидание и ФР длительности задержки IP-пакетов. Второй вид рассматриваемых характеристик косвенно связан с нормируемыми показателями качества обслуживания. Примерами подобных характеристик могут служить моменты случайной величины, позволяющие судить о законе ее распределения.

В большинстве монографий по теории массового обслуживания основное внимание уделяется системам с простейшим входящим потоком и двумя видами распределения времени обслуживания заявок. Анализируются СМО с экспоненциальной функцией $B(t)$ и с постоянным временем обслуживания заявок. Для этих СМО в явном виде получены формулы для ФР длительности задержки заявок – $S(t)$. Они приведены в Приложении 2.

Большой интерес представляет анализ СМО, в которой информация о длительности обслуживания представлена в виде гистограммы. В этом случае приходится оперировать ступенчатой функцией $B(t)$, что позволяет избежать ошибок аппроксимации результатов измерений. Часто ступенчатая функция отражает реальный процесс обслуживания заявок. По этим причинам вывод формулы $S(t)$ для ступенчатой ФР времени обслуживания заявок также представляет практический интерес.

Полезны модели СМО, в которых время обслуживания подчиняется распределению Эрланга $k-го$ порядка, экспоненциальному с предварительной постоянной задержкой и равномерному на отрезке $[0,\tau]$. В некоторых случаях гипотезу о простейшем входящем потоке заявок нельзя считать приемлемой. Тогда следует анализировать однолинейную модель общего вида – $G/G/1$.

В сети ССП предусмотрена возможность приоритетного обслуживания некоторых IP-пакетов. Следовательно, средние значения длительности задержки и соответствующие ФР необходимо рассчитывать для СМО с приоритетами. Для подобных задач известны выражения для средних значений длительности задержки заявок $k-го$ приоритета. ФР длительности задержки получены для ограниченного ряда СМО. Чаще исследователи прибегают к имитационному моделированию, но данный метод может быть использован не всегда.

Рекомендация МСЭ Y.1541, как и ряд других документов, устанавливает нормы на показатели качества обслуживания в ССП для сети в целом. Подобный принцип нормирования учитывает требования пользователей, которые следует считать важнейшим фактором при выборе численных значений показателей качества обслуживания. Нормы для сети в целом, которые известны в англоязычной технической литературе по термину "end-to-

---

[1] *В этом Приложении без дополнительных объяснений используются обозначения и термины, которые были введены ранее. Предполагается, в частности, что читателю уже знакомы материалы, изложенные в первом и во втором Приложениях.*

end", необходимо "разделить" между основными компонентами системы связи. Задачи по декомпозиции норм на показатели качества обслуживания также решаются с использованием методов теории массового обслуживания. В результате, устанавливаются нормы, определяющие показатели качества обслуживания для основных компонентов телекоммуникационной сети.

Для решения поставленной задачи приходится рассматривать многофазные системы и сети массового обслуживания. Средние значения длительности задержки заявок в силу аддитивности математического ожидания вычисляются сравнительно просто. Иная ситуация характерна для ФР. Вывод этой функции для многофазных систем – сложная задача. Часто приходится использовать имитационное моделирование или существенно упрощать исследуемую модель. В последнем случае необходимо оценить ошибку, которая обусловлена изменением модели. Задачам анализа СеМО посвящено Приложение 7.

В этом Приложении исследуются СМО трех видов $M/G/1$, $G/M/1$ и $G/G/1$. В ряде случаев мы будем возвращаться к моделям $M/M/1$ и $M/D/1$, результаты анализа которых были приведены в Приложении 2, для иллюстрации некоторых закономерностей.

Наука выигрывает, когда ее
крылья раскованы фантазией.
(Майкл Фарадей)

П6.2. Системы с простейшим входящим потоком

Системы с простейшим входящим потоком, рассматриваемые в ряде следующих разделов, в модифицированной классификации Кендалла представимы в такой форме:

$$M/G/1/\infty/f_0^0. \qquad (П6.1)$$

Предполагается, что число мест для ожидания не ограничено, а обслуживание заявок осуществляется в порядке их поступления без назначения каких-либо приоритетов. Для произвольного распределения длительности обслуживания заявок (символ "G") известно несколько формул, позволяющих анализировать основные характеристики СМО. Для задач оценки пропускной способности компонента телекоммуникационной сети одним из важнейших результатов считается преобразование Лапласа-Стилтьеса распределения длительности задержки заявок [1, 2]:

$$\xi(s) = \frac{(1-\rho)s\beta(s)}{s-\lambda+\lambda\beta(s)}. \qquad (П6.2)$$

Из формулы (П6.2) дифференцированием можно найти моменты времени задержки заявок. С учетом принятых принципов нормирования показателей качества обслуживания большой практический интерес представляет математическое ожидание времени задержки заявок в СМО вида (П6.1). Оно определяется по такой формуле [1, 2]:

$$S^{(1)} = B^{(1)}\left[\frac{\rho(1+v_B^2)}{2(1-\rho)}+1\right]. \qquad (П6.3)$$

Расчет среднего значения длительности задержки заявок обычно осуществляется при исследовании процессов функционирования СМО. Для задач планирования приходится решать обратную задачу. Допустимая величина средней длительности задержки заявок обычно заранее известна. Требуется решить одну из двух похожих задач:

- найти максимальную величину входящего потока заявок λ при известной интенсивности обслуживания μ;
- рассчитать необходимую интенсивность обслуживания μ для известного уровня трафика λ.

Вторая задача чаще встречается в практике проектирования сетей телефонной связи. По этой причине следует найти величины необходимой интенсивности обслуживания для двух моделей: $M/M/1$ – μ_M и $M/D/1$ – μ_D. Для системы $M/M/1$ величина ν_B равна единице. Следовательно, значение μ_M определяется по такой формуле:

$$\mu_M = \frac{1+\lambda S^{(1)}}{S^{(1)}}. \qquad (П6.4)$$

Необходимая интенсивность обслуживания для системы $M/D/1$ вычисляется из формулы (П6.3) при условии, что $\nu_B = 0$:

$$\mu_D = \frac{\left[1+\lambda S^{(1)}\right] + \sqrt{1+\left[\lambda S^{(1)}\right]^2}}{2S^{(1)}}. \qquad (П6.5)$$

Очевидно, что $\mu_M > \mu_D$. Соотношение этих двух величин удобно рассматривать как функцию $\varphi(x)$. Переменная x представляет собой произведение $\lambda S^{(1)}$:

$$\varphi(x) = \frac{\mu_M}{\mu_D} = \frac{2(1+x)}{(1+x)+\sqrt{1+x^2}}. \qquad (П6.6)$$

При малой интенсивности входящего потока $(\lambda \to 0)$ дробь близка к единице. Такое соотношение величин μ_M и μ_D имеет очевидный физический смысл. При малой нагрузке задержка заявок в СМО определяется длительностью их обслуживания. Эти величины в обеих системах одинаковы. При большой интенсивности входящего потока, когда $\lambda \to \mu$, можно считать, что $\lambda S^{(1)} >> 1$. Интересно, что и в этом случае результат деления μ_M на μ_D становится близким к единице. Физический смысл такого соотношения понятен, если детально проанализировать поведение СМО с ожиданием при $\rho \to 1$ [1].

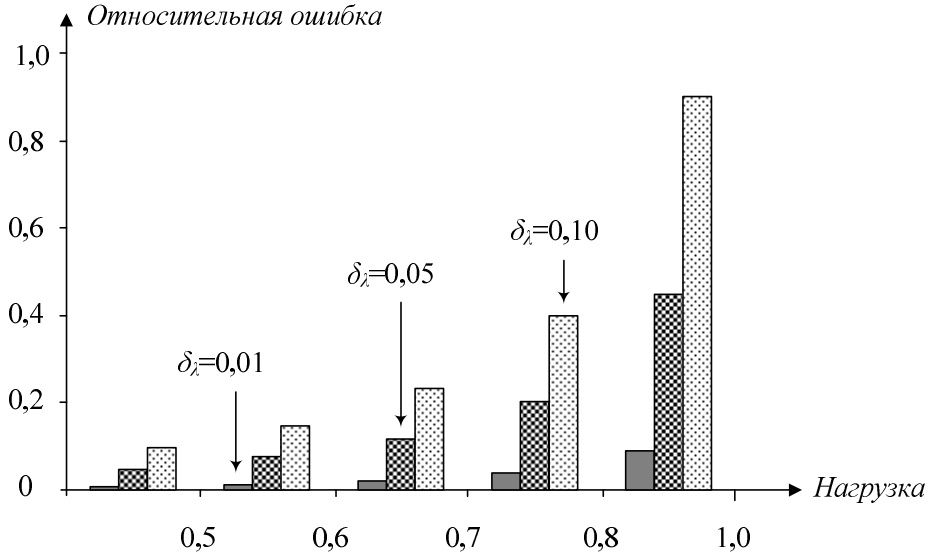
Последние формулы позволяют провести ряд расчетов, устанавливающих влияние погрешности в исходных данных на точность решения поставленной задачи. Для исследования качественного характера этих влияний достаточно провести простейший анализ для системы вида $M/M/1$. Из формулы (П6.4) можно получить два следующих выражения:

$$S^{(1)} \pm \Delta S^{(1)} = \frac{1}{\mu - (\lambda \pm \Delta\lambda)}, \quad \mu \pm \Delta\mu = \frac{1}{S^{(1)}} + (\lambda \pm \Delta\lambda). \qquad (П6.7)$$

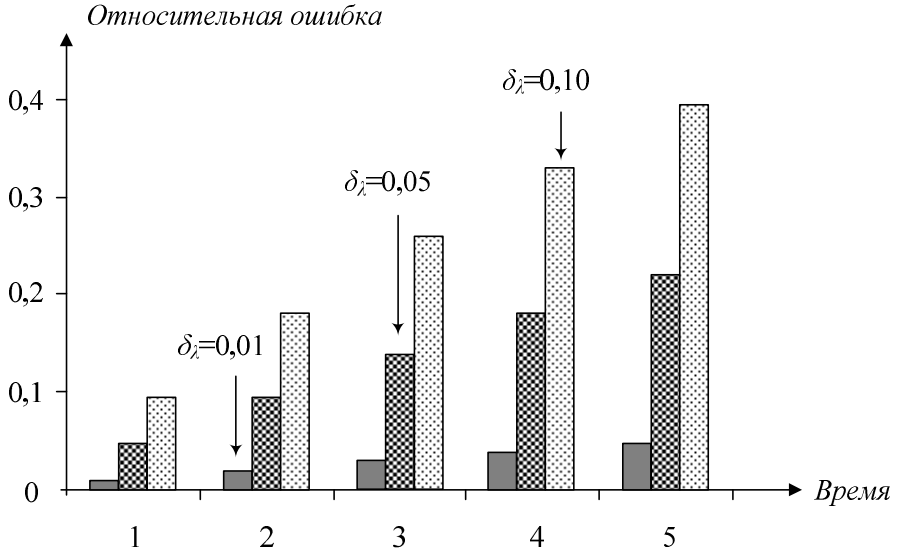
Они содержат абсолютные ошибки, обозначенные символом Δ, которые появляются при расчете среднего значения задержки заявок и интенсивности их обслуживания. По этим формулам можно найти соответствующие относительные ошибки – δ_S и δ_μ:

$$\delta_S = \frac{\rho}{1-\rho}\delta_\lambda, \quad \delta_\mu = \delta_\lambda. \qquad (П6.8)$$

Величина δ_λ определяет относительную ошибку, возникающую в процессе оценки или измерения интенсивности входящего потока заявок. Графики относительной ошибки δ_S показаны в верхней части рисунка П6.1 для пяти значений ρ. Для больших значений нагрузки ошибки в оценках математического ожидания времени пребывания заявок в СМО могут достигать очень существенных величин. Нижний фрагмент рисунка П6.1 иллюстрирует зависимость величины δ_S от времени при вычислении ФР. На оси "Время" указаны величины, нормированные к среднему значению длительности обслуживания заявок.



а) Изменение ошибки при вычислении средних значений задержки



б) Изменение ошибки при вычислении ФР длительности задержки

Рисунок П6.1. Ошибки в расчете характеристик СМО

Следует учесть одно очевидное соображение: все ФР при больших значениях t стремятся к единице. По этой причине даже аппроксимация вида $S(t) \equiv 1$ для значений t, которые превышают некоторый порог t_{max}, может гарантировать вполне приемлемую ошибку. Корректнее исследовать ошибку в оценке дополнительной ФР – $V(t)$, которая рассчитывается по такой формуле:

$$V(t) = 1 - S(t). \qquad (П6.9)$$

Простейшая модель для дальнейших рассуждений – система $M/M/1$. Для этой СМО дополнительная ФР времени задержки в системе определяется так [1]:

$$V(t) = e^{-(\mu-\lambda)t}. \qquad (П6.10)$$

С учетом погрешности оценок или измерений характеристик исследуемой системы можно записать два выражения:

$$V(t) \pm \Delta V(t) = e^{(\lambda \pm \Delta\lambda - \mu)t}, \ \mu = (\lambda \pm \Delta\lambda) - \frac{lnV(t)}{t}. \qquad (П6.11)$$

Эти результаты позволяют рассчитать те относительные ошибки δ_V и δ_μ, которые обусловлены погрешностями оценки или измерений характеристик исследуемой СМО:

$$\delta_V = 1 - e^{\pm\Delta\lambda t}, \ \delta_\mu = \delta_\lambda . \qquad (П6.12)$$

Выражение для расчета δ_V можно представить в другой редакции, если измерять время t через интенсивность входящего потока заявок: $t = k\lambda^{-1}$. В этом случае формула для расчета ошибки δ_V принимает такой вид:

$$\delta_V = 1 - e^{\delta_\lambda k}. \qquad (П6.13)$$

Принципы нормирования показателей QoS в современных инфокоммуникационных сетях таковы, что величина k – в некоторых случаях – может выражаться двухзначным числом. Для соответствующих значений времени ошибка в расчете величины δ_V может стать весьма существенной. Подобный характер ошибок сохраняется при расчетах для "хвоста" распределения. К этому вопросу мы еще вернемся.

Итак, формула (П6.3) позволяет рассчитывать математическое ожидание времени задержки заявок в исследуемом классе СМО. Для моделей вида $M/M/1$ и $M/D/1$ из соотношения (П6.2) выводится ФР длительности задержки заявок. Эти функции были приведены во втором Приложении. В ряде случаев функцию $B(t)$ можно определить в результате измерений. Если процесс измерений трафика организован в соответствии с установленными принципами [3], то полученная гистограмма позволяет достоверно определить функцию $B(t)$.

Число отсчетов (элементов гистограммы) может изменяться в широких пределах. Некоторые процессы представимы ступенчатой функцией, содержащей десятки и даже сотни приращений. Без применения средств вычислительной техники использование подобных гистограмм для дальнейшего анализа СМО не представлялось возможным. Поэтому ранее все распределения, представленные в результате проведенных измерений ступенчатыми функциями, аппроксимировались непрерывными кривыми. Такой подход в некоторых случаях позволял упростить дальнейшие вычисления. Правда, аппроксимация гистограммы непрерывной кривой, определяемой обычно на интервале $[0,\infty)$, чревата ошибками по двум основным причинам:

- замена достоверной ступенчатой ФР $B(t)$ непрерывной кривой, которая осуществляется, например, методом наименьших квадратов [4], не позволяет численно оценить последствия этой операции;
- "пролонгация" ФР времени обслуживания, ограниченной в реальной системе связи величиной t_{max}, до бесконечности (по оси "Время") может радикально изменить результаты последующих расчетов.

Предположим, что измерения длительности обслуживания заявок в исследуемой СМО показали следующее:

- с вероятностью P_1 заявка обслуживается за время τ;
- с вероятностью P_3 заявка обслуживается за время 3τ;
- с вероятностью P_5 заявка обслуживается за время 5τ.

На рисунке П6.2 приведен пример аппроксимации результатов измерений функции $B(t)$ экспоненциальным законом. Ниже, для этого же примера, будет проанализирована величина ошибки, обусловленной использованием непрерывной ФР.

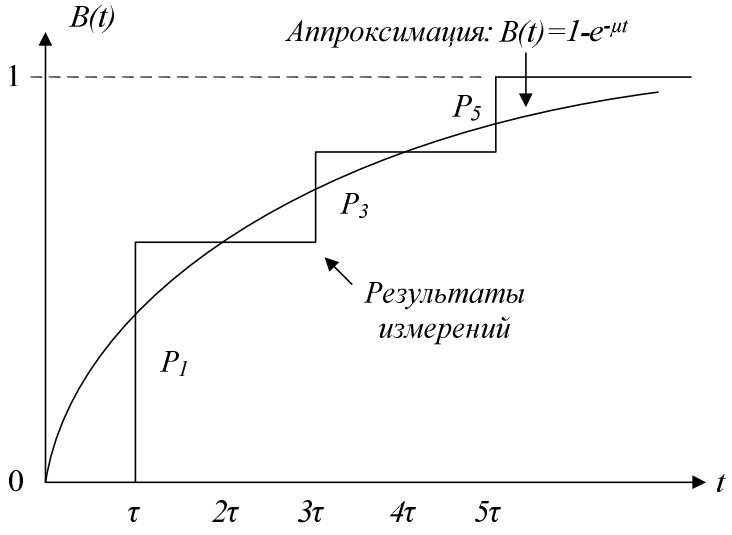


Рисунок П6.2. Функция распределения времени обслуживания заявок и ее аппроксимация непрерывной кривой

При $t \geq 5\tau$ ФР длительности обслуживания заявок в СМО становится равной единице. Аппроксимация таким свойством не обладает: экспонента определена на отрезке времени $[0, \infty)$. Расчет интенсивности обслуживания заявок – μ обычно осуществляется одним из двух методов. Первый метод подразумевает вычисление математического ожидания длительности обслуживания заявок в системе – $B_M^{(1)}$ по результатам, которые получены при проведении измерений:

$$B_M^{(1)} = \tau(P_1 + 3P_3 + 5P_5). \qquad (П6.14)$$

Далее предполагается, что аппроксимирующая функция может быть представлена распределением с тем же средним значением длительности обслуживания заявок. Это означает, что справедливо следующее равенство:

$$\mu = \frac{1}{B_M^{(1)}}. \qquad (П6.15)$$

Второй метод основан на численном нахождении такой величины μ, чтобы ошибка аппроксимации была минимальна. Обычно применяется метод наименьших квадратов [4], апробированный для решения подобного рода задач. Рассмотрим численный пример для таких результатов измерений:

- $P_1 = 0,6$;
- $P_2 = 0,3$;
- $P_3 = 0,1$.

Величину τ целесообразно принять равной единице. Для выбранной функции $B(t)$ по формуле (П6.14) получаем, что $\mu = 0,5$. При использовании метода наименьших квадратов величина интенсивности обслуживания составляет примерно 0,898. На рисунке П6.3 приведены три функции $B(t)$. Нижние индексы в формулах ФР указывают на метод получения величины μ. Очевидно, что $\mu_1 = 0,5$ и $\mu_2 \approx 0,898$.

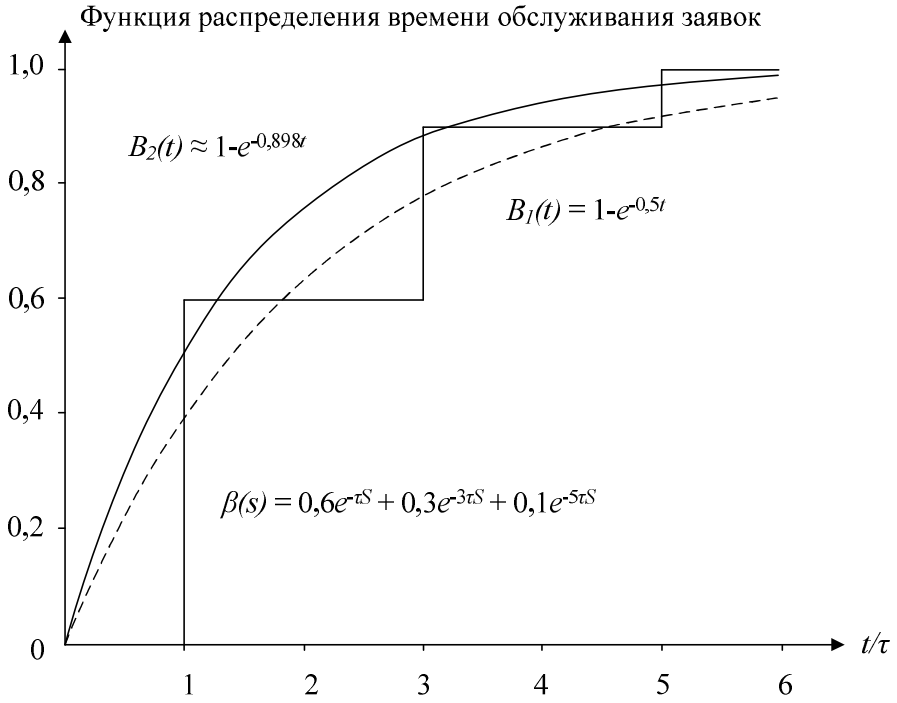


Рисунок П6.3. Две аппроксимации функции распределения времени обслуживания заявок

В точке τ_{-0} для обеих аппроксимаций в рассматриваемом примере наблюдается максимальная ошибка. Функция $B_1(t)$ отличается от истинного значения $B(t)$ примерно на 0,39. Для функции $B_2(t)$ эта ошибка составляет около 0,59. В таблице П6.1 для обеих аппроксимаций приведены численные значения ошибок при оценке ряда характеристик времени обслуживания заявок. Для функции $B(t)$ во второй строке таблицы приведены точные значения оцениваемых характеристик.

Таблица П6.1. Ошибки двух аппроксимаций распределения $B(t)$

Исследуемые функции	$B^{(1)}$	σ_B	ν_B
Распределение $B(t)$	2	1,3416	0,6708
Ошибки для $B_1(t)$	0	49%	49%
Ошибки для $B_2(t)$	44%	17%	49%

Функции $B_1(t)$, для которой ошибка в расчете первого момента всегда равна нулю, свойственна большая погрешность в оценке дисперсии. Метод наименьших квадратов [4] минимизирует дисперсию оценок. Поэтому погрешность в оценке дисперсии для функции $B_2(t)$ минимальная. Правда, ошибка при расчете математического ожидания времени обслуживания заявок становится весьма существенной.

Интересен анализ влияния аппроксимаций $B_i(t)$ на характеристики длительности задержки заявок в СМО со ступенчатой ФР времени обслуживания. Из выражения (П6.2) можно получить второй начальный момент длительности задержки заявок в СМО. Для этого нужно взять вторую производную от выражения $\xi(s)$ и найти ее значение при $s = 0$. После этого можно составить таблицу П6.2, в которой отражены ошибки в оценках трех характеристик исследуемой СМО. Следует подчеркнуть, что из-за различий в значениях μ – при одной и той же величине интенсивности входящего потока заявок – нагрузка СМО не будет одинаковой. Поэтому таблица П6.2 составлена для значения величины λ, которое равно 0,25. Тогда нагрузка исследуемой системы равна 0,5. Такая же величина

нагрузки свойственна СМО вида $M/M/1$, для которой распределение длительности обслуживания аппроксимировано функцией $B_1(t)$. Если исходное распределение заменить функцией $B_2(t)$, то нагрузка СМО меняется. Она составляет примерно 0,278.

Таблица П6.2. Ошибки при расчете параметров длительности задержки заявок

Исследуемые функции	$S^{(1)}$	σ_S	ν_S
Распределение $B(t)$	3,45	2,7269	0,7904
Ошибки для $B_1(t)$	16% 1)	64% 1)	42% 2)
Ошибки для $B_2(t)$	55% 1)	24% 1)	69% 2)

Примечания:

1) Для обоих распределений $B_1(t)$ и $B_2(t)$ полученные значения $S^{(1)}$ и σ_S определяют соответственно верхнюю и нижнюю границы исследуемых характеристик СМО.

2) Для обоих распределений $B_1(t)$ и $B_2(t)$ полученные значения ν_S определяют верхнюю границу коэффициента вариации длительности задержки заявок в СМО.

Ошибка в расчете среднего значения времени задержки заявок в СМО при любой аппроксимации функции $B(t)$ зависит от нагрузки системы. Для первой аппроксимации величина относительной ошибки в оценке длительности задержки заявок – δ_1 может быть вычислена по такой формуле:

$$\delta_1 = \frac{\rho(\nu_B^2 - 1)}{2 + \rho(\nu_B^2 - 1)}. \qquad (П6.16)$$

При малых значениях ρ ошибка в расчете среднего значения времени задержки заявок, обусловленная заменой истинного распределения длительности их обслуживания функцией $B_1(t)$, не столь существенна. При увеличении нагрузки ошибка δ_1 монотонно возрастает до своего максимума:

$$\frac{\nu_B^2 - 1}{\nu_B^2 + 1}. \qquad (П6.17)$$

Примечательны некоторые закономерности для результатов, которые приведены в таблицах П6.1 и П6.2. Эти закономерности справедливы при замене ступенчатой ФР длительности обслуживания заявок, для которой $\nu_B < 1$, экспоненциальным законом. Результаты двух вариантов аппроксимации функции $B(t)$ можно сформулировать так:

- метод наименьших квадратов позволяет определить нижнюю границу для среднего значения и дисперсии времени задержки заявок в СМО;
- замена ступенчатой функции $B(t)$ экспоненциальным распределением с тем же значением интенсивности позволяет определить верхнюю границу для среднего значения и дисперсии времени задержки заявок в СМО;
- использование метода наименьших квадратов приводит к меньшим ошибкам при расчете дисперсий длительности обслуживания и задержки заявок;
- замена ступенчатой функции $B(t)$ экспоненциальным распределением с тем же значением интенсивности позволяет уменьшить ошибку при вычислениях средних значений длительности обслуживания и задержки заявок;
- при любой аппроксимации исходной ФР экспоненциальным распределением рассчитанная величина ν_S определяет верхнюю границу этой характеристики СМО.

Для СМО вида $M/HD/1$ математическое ожидание длительности задержки заявок рассчитывается по формуле (П6.3). Для вычисления квадрата коэффициента вариации ν_B можно воспользоваться следующим выражением:

$$\nu_B^2 = \frac{\sum\limits_{\{J\}} j^2 P_j - \left(\sum\limits_{\{J\}} jP_j\right)^2}{\left(\sum\limits_{\{J\}} jP_j\right)^2}. \qquad (П6.18)$$

Множество $\{J\}$ определяет все те точки на оси "Время", в которых возможны приращения ФР длительности обслуживания заявок – P_j. Теперь все величины для расчета среднего значения длительности задержки заявок с СМО вида $M/HD/1$ по формуле (П6.3) известны. Необходимо найти ФР длительности пребывания заявок в исследуемой СМО. Она может быть получена на основе результатов, которые содержатся в [5]. Автор этой публикации использовал другую форму выражения (П6.2). Функция $\xi(s)$ представлена суммой членов бесконечно убывающей геометрической прогрессии [6]:

$$\xi(s) = (1-\rho)s\sum_{i=0}^{\infty}(-1)^i \frac{\lambda^i}{(s-\lambda)^{i+1}}\left[\beta(s)\right]^{i+1}. \qquad (П6.19)$$

При исследовании СМО вида $M/HD/1$ в [5] сначала находится распределение для времени ожидания начала обслуживания. Такой подход объясняется простой связью функций $\omega(s)$ и $\xi(s)$. Распределение времени обслуживания заявок в исследуемой СМО всегда можно представить такой суммой:

$$\beta(s) = \sum_{j=1}^{g} P_j e^{-j\tau s}. \qquad (П6.20)$$

Распределение задержки в системе на основании первой теоремы смещения будет определяться следующим образом:

$$S(t) = \sum_{j=1}^{g} P_j \Psi_+(t-i\tau) W(t-i\tau). \qquad (П6.21)$$

Обозначение $\Psi_+(t-i\tau)$ использовано для функции, имеющий единичный скачок при нулевом значении аргумента:

$$\Psi_+(x) = \begin{cases} 1 & при\ x \ge 0 \\ 0 & при\ x < 0 \end{cases}. \qquad (П6.22)$$

Это означает, что функция $W(t-j\tau)$ определена лишь для положительных значений аргумента. Для отрицательных значений аргумента она равна нулю. Таким образом, для системы $M/HD/1$ достаточно вывести формулу, определяющую функцию $W(t)$. В [5] искомое выражение получено в таком виде:

$$W(t) = (1-\rho)\left\{ e^{\lambda t} + \sum_{i=1}^{\left[\frac{t}{\tau}\right]} e^{\lambda(t-i\tau)} \sum_{j=1}^{i} (-1)^j \frac{\lambda^j (t-i\tau)^j}{j!} R_{ij} \right\}. \qquad (П6.23)$$

Коэффициенты R_{ij} можно определять по алгоритму, приведенному в таблице [5], или рассчитывать по рекуррентной формуле, которая предложена в [7]. Она получена для

расчета коэффициентов при слагаемых вида $e^{-k\tau s}$ при возведении функции $\beta(s)$ в $k-ю$ степень:

$$\left[\beta(s)\right]^k = \left(\sum_{j=1}^{g} P_j e^{-j\tau s}\right)^k = \sum_{n=k}^{kg} Q_{kn} e^{-n\tau s}. \qquad (П6.24)$$

В свою очередь, коэффициенты Q_{kn} определяются по правилу возведения ряда в степень k:

$$Q_{kn} = \begin{cases} P_1^k \quad при \quad n = k \\ \dfrac{\sum_{l=1}^{n-k} [l(k+1)-(n-k)] P_{l+1} Q_{k(n-l)}}{(n-k)P_1} \quad при \quad n = \overline{k+1, kg} \end{cases}. \qquad (П6.25)$$

В данном случае предполагается, что $P_1 \neq 0$. Если такое условие не выполняется, то функцию $\beta(s)$ следует преобразовать. За знак суммы в формуле (П6.20) надо вынести множитель $e^{-x\tau s}$, в котором x определяет количество периодов τ до первого ненулевого приращения функции $\beta(s)$. Коэффициенты R_{ij} и Q_{kn} связаны между собой простым соотношением:

$$R_{ij} = Q_{ji}. \qquad (П6.26)$$

Анализ соотношений (П6.23) – (П6.25) показывает, что при больших значениях t могут возникать проблемы с точностью вычисления функции $S(t)$. С этой точки зрения целесообразно выделить два отрезка времени. Для первого отрезка времени – $(0, T_1)$ следует использовать точную формулу для анализируемого распределения. Если же $t > T_1$, то допустимо использовать приближение, которое позволяет оценивать функцию $S(t)$ с достаточно малой погрешностью. Обычно $T_1 \approx 5B^{(1)}$. Весьма точное приближение для распределения $S(t)$ можно получить при использовании разложения Хевисайда [8, 9]. Преобразование Лапласа-Стилтьеса для любой ФР можно представить как отношение полиномов $\eta_1(s)$ и $\eta(s)$. Если полином $\eta(s)$ имеет n простых корней, обозначаемых далее как s_i ($i = \overline{1, n}$), то оригинал можно представить в такой редакции:

$$S(t) = \sum_{i=1}^{n} \frac{\eta_1(s_i)}{\eta'(s_i)} e^{s_i t}. \qquad (П6.27)$$

Таким образом, разложение Хевисайда позволяет записать искомую функцию $S(t)$ в виде совокупности n экспоненциальных функций. При больших значениях t характер функции $S(t)$ будет определяться минимальным по модулю корнем – s_x. Для поиска этого корня необходимо рассмотреть знаменатель выражения (П6.2):

$$\eta(s) = s - \lambda + \lambda\beta(s). \qquad (П6.28)$$

Первый корень полинома $\eta(s)$ – ноль. Несложно убедиться, что именно этот корень определяет типичное первое слагаемое для ФР – единицу. Обозначим модуль s_x через z. В этом случае экспоненциальная функция будет выглядеть привычнее. С той же целью в числителе приближенной формулы будем использовать сомножитель $(\rho - 1)$. Тогда после единицы будет стоять знак "минус", характерный для распределений случайных величин. Обозначим также значение производной от $\beta(s)$ в точке $s = -z$ через $f(-z)$. В результате

этих операций приближенное выражение для оценки искомой функции приобретает следующий вид:

$$S(t) \approx 1 - \frac{(\rho - 1)\beta(-z)}{1 + \lambda f(-z)} e^{-zt} \approx 1 - Ae^{-zt}. \qquad (П6.29)$$

Для системы $M/M/1$ после ряда несложных преобразований можно убедиться, что $z = \mu - \lambda$, $A = 1$, а приближенная формула (П6.29) совпадает с точной. Для всех других моделей СМО эта формула остается приближенной. В некоторых случаях $A > 1$, что приводит к отрицательному значению ФР на начальном участке оси "Время". Данный казус приходится только на ту область изменения времени, которая не удовлетворяет неравенству $t > T_1$, то есть там, где приближенная формула не применяется. Тем не менее, выражение (П6.29) лучше представить в такой редакции:

$$S(t) \approx \begin{cases} 0 & при \;\; t \le t_0 \\ 1 - e^{-z(t - t_0)} & при \;\; t > t_0 \end{cases}. \qquad (П6.30)$$

Величина t_0 определяется с помощью простого соотношения, благодаря которому унифицируется форма представления функции $S(t)$:

$$t_0 = \frac{lnA}{z}. \qquad (П6.31)$$

При $A < 1$ величина t_0 становится отрицательной. Тогда целесообразно использовать другую трактовку хода кривой, построенной по приближенной формуле для расчета $S(t)$. В точке $t = 0$ происходит скачок ФР $S(t)$. Очевидно, что величина этого скачка равна $(1 - A)$, а при $t < 0$ ФР времени задержки заявок равна нулю.

Вторая особенность расчета ФР заключается в корректной оценке возникающих ошибок при использовании приближенных соотношений, а также в том случае, когда следует ограничить предел суммирования рядов, содержащих бесконечное количество членов. Относительную ошибку в расчете значений $S(t)$ целесообразно оценивать для дополнительных ФР. Причина такого подхода заключается в том, что при сравнительно больших значениях t, когда функция $S(t)$ становится близкой к единице, практически любое приближение приводит к минимальной ошибке. С дополнительной ФР подобных метаморфоз не происходит.

Одна из самых важных практических задач заключается в том, чтобы определить область разумного использования точных и приближенных методов при вычислении функций $S(t)$. Можно выделить два фактора, влияющих на точность расчетов. Во-первых, ошибка существенно зависит от соотношения t и $B^{(1)}$. Чем оно выше, тем более точные результаты можно получить при расчетах по приближенной формуле. Во-вторых, на ошибку заметно влияет уровень нагрузки СМО. Максимальная точность, как правило, присуща моделям с высокой нагрузкой.

Следует подчеркнуть еще один аспект аппроксимаций ФР $S(t)$ формулой (П6.30). Другие приближенные соотношения для $S(t)$, приведенные, например, в [2, 10], можно представить в аналогичной форме:

$$S(t) = 1 - A_X e^{-z_X t}. \qquad (П6.32)$$

Различие между двумя видами аппроксимаций целесообразно оценивать следующим отношением:

$$\frac{A}{A_X} e^{-(z - z_X)t}. \qquad (П6.33)$$

Из этого выражения следует, что точность аппроксимаций, в которых корень z не вычисляется, а выражается через параметры модели, падает с ростом t. Поэтому расчеты дополнительных ФР длительности задержки заявок целесообразно выполнять только по формуле (П6.30).

На рисунке П6.4 приведены дополнительные ФР длительности задержки заявок в системе вида $M/HD/1$. В качестве распределения $B(t)$ выбрана ступенчатая функция, изображенная на рисунке П6.3. Результаты вычислений по точной формуле показаны для нагрузки 0,05. Кривые, рассчитанные по приближенной формуле, построены для трех значений ρ: 0,05, 0,5 и 0,9.

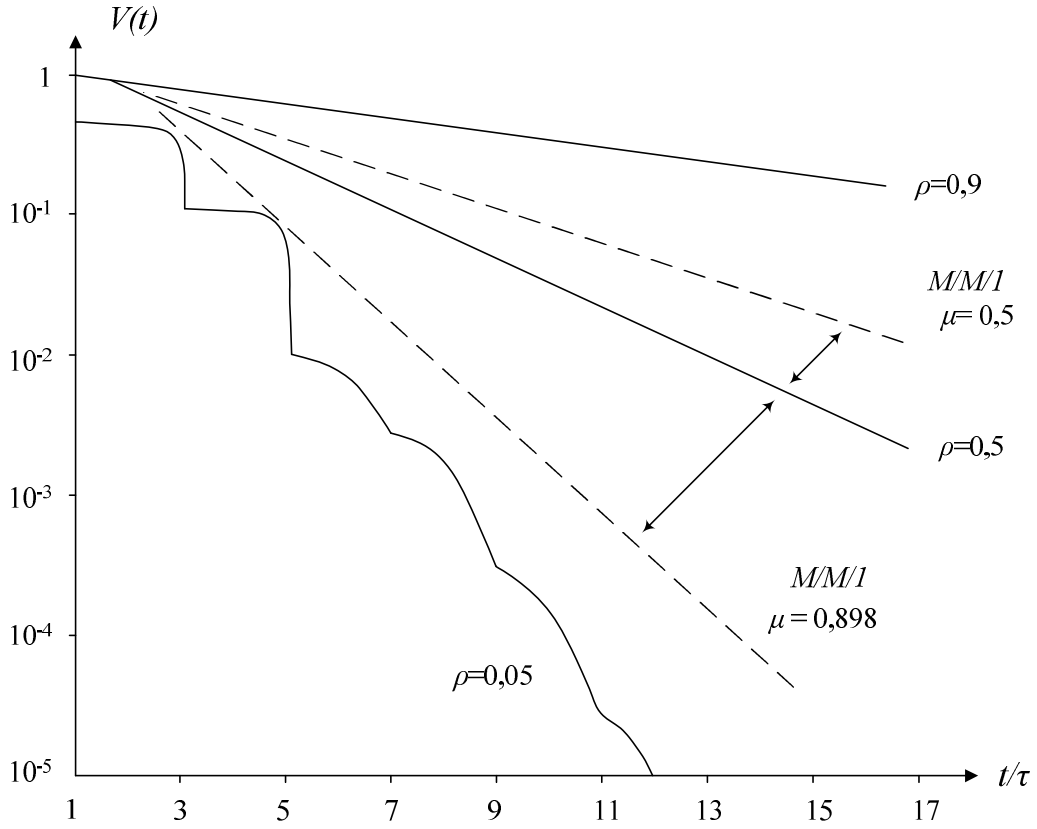


Рисунок П6.4. Дополнительная ФР длительности задержки заявок в системе $M/HD/1$

Для $\rho = 0,5$ на рисунке пунктирными линиями показаны две дополнительные ФР, полученные для модели $M/M/1$. Использование данной модели позволяет заменить ступенчатую функцию $B(t)$ экспоненциальной. Очевидно, что ошибки в расчете функции $V(t) = 1 - S(t)$ при такой замене становятся весьма существенными. С другой стороны, две рассматриваемые системы $M/M/1$ позволяют получить верхнюю и нижнюю границы для распределения длительности задержки заявок. Различие в функциях дополнительной ФР обусловлено значениями интенсивности обслуживания μ. Они выбраны по правилам, которые были сформулированы выше при анализе функций $S(t)$, показанных на рисунках П6.2 и П6.3.

Ошибка в расчете дополнительной ФР длительности задержки заявок уменьшается с ростом t. Для одного и того же значения t ошибка уменьшается с ростом нагрузки системы. Таблица П6.3 содержит сведения об относительных ошибках, обусловленных расчетами функции $V(t)$ по приближенной формуле. Очевидно, что в области $t > 5B^{(1)}$ использование приближенной формулы позволяет выполнять вычисления с приемлемой относительной ошибкой.

Таблица П6.3. Относительные ошибки при приближенном расчете функции $V(t)$

Время, $t / B^{(1)}$	Ошибка при расчете исследуемой функции для нагрузки:		
	$\rho = 0,1$	$\rho = 0,5$	$\rho = 0,9$
1	–1,187	–0,444	$4,874\times10^{-3}$
2	–0,709	–0,113	$1,809\times10^{-2}$
3	–0,618	$-2,878\times10^{-2}$	$-5,781\times10^{-4}$
4	$3,871\times10^{-2}$	$1,095\times10^{-2}$	$-3,667\times10^{-4}$
5	0,169	$6,789\times10^{-3}$	$-3,725\times10^{-4}$
6	$4,075\times10^{-2}$	$1,304\times10^{-3}$	$-3,028\times10^{-4}$
7	$1,680\times10^{-2}$	$2,715\times10^{-4}$	$-2,921\times10^{-4}$
8	$-7,142\times10^{-2}$	$1,081\times10^{-4}$	$-3,569\times10^{-4}$

Возможность использования приближенной формулы для оценки распределения длительности задержки заявок в СМО определяется видом нормируемого квантиля. Если квантиль определяется в точках, где $S(t) = 0,5$ или $S(t) = 0,9$, то чаще всего приходится выполнять вычисления по точной формуле. В рекомендациях МСЭ для показателей качества обслуживания пакетного трафика в сети следующего поколения нормируется квантиль для $S(t) = 0,999$. Тогда применение приближенных формул для расчета ФР длительности задержки заявок вполне приемлемо.

Формулу (П6.19) целесообразно использовать и для анализа ряда других СМО, среди которых следует выделить две системы. Во-первых, практический интерес представляет система, в которой функция $B(t)$ подчиняется распределению Эрланга $k-го$ порядка. Это распределение очень давно применяется при исследовании некоторых элементов инфокоммуникационных сетей, представимых в виде СМО [2]. Во-вторых, в ряде случаев функция $B(t)$ может быть хорошо аппроксимирована экспоненциальным распределением при условии, что перед обслуживанием каждая заявка задерживается на время τ, которое не меняется. Систему с таким распределением длительности обслуживания заявок можно обозначить так: $M / D + M / 1$.

Формула (П6.2) для распределения Эрланга $k-го$ порядка может быть переписана следующим образом:

$$\xi(s) = (1-\rho)s\sum_{i=0}^{\infty}\frac{(-1)^i\lambda^i(k\mu)^{k(i+1)}}{(s-\lambda)^{i+1}(s+k\mu)^{k(i+1)}}. \qquad (П6.34)$$

Дробь под знаком суммы может быть представлена в виде отношения полиномов $\eta_1(s)$ и $\eta(s)$. Полином $\eta(s)$ содержит кратные корни: $s_1 = \lambda$ и $s_2 = -k\mu$. В [8, 9] для подобных случаев предложено правило нахождения оригинала, на основании которого функцию $S(t)$ можно представить так:

$$S(t) = (1-\rho)\sum_{i=o}^{\infty}(-1)^i\lambda^i(k\mu)^{k(i+1)}\sum_{n=1}^{2}e^{s_n t}\sum_{j=1}^{m_n}H_{nj}t^{m_n-j}. \qquad (П6.35)$$

Величина m_n равна показателю степени полинома знаменателя – $\eta(s)$. Возможны всего два значения этой величины: $i+1$ и $k(i+1)$. Коэффициенты H_{nj} определяются в соответствии с правилами, приведенными в [8, 9]:

$$H_{nj} = \frac{1}{(j-1)!(m_n-j)!}\frac{d^{j-1}}{ds^{j-1}}\left[\frac{(s-s_n)\eta_1(s)}{\eta(s)}\right]. \qquad (П6.36)$$

После ряда преобразований выражение для расчета ФР времени задержки заявок в СМО вида $M / E_K / 1$ может быть представлено в таком виде [11]:

$$S(t)=(1-\rho)\sum_{i=0}^{\infty}(-1)^i\lambda^i(k\mu)^{k(i+1)}\left[e^{\lambda t}\sum_{j=1}^{i+1}P_j t^{i-j+1}+(-1)^{i+1}e^{-k\mu t}\sum_{j=1}^{k(i+1)}Q_j t^{k(i+1)-j}\right].\quad(\text{П}6.37)$$

Коэффициенты P_j и Q_j, входящие в формулу для искомого распределения, можно вычислить по таким формулам [11]:

$$P_j=\frac{(-1)^{j-1}C_{k(i+1)+j-2}^{j-1}}{(i+1-j)!(\lambda+k\mu)^{k(i+1)+j-1}},\quad Q_j=\frac{C_{i+j-1}^{j-1}}{(k(i+1)-j)!(\lambda+k\mu)^{i+j}}.\quad(\text{П}6.38)$$

Для СМО вида $M/E_2/1$ корни s_1 и s_2 находятся в результате решения квадратного уравнения:

$$s_{1,2}=\frac{(\lambda-4\mu)\pm\sqrt{\lambda^2+8\lambda\mu}}{2}.\quad(\text{П}6.39)$$

Несложно убедиться, что оба корня – отрицательные величины при условии, что $\lambda<\mu$. Теперь функция $S(t)$ может быть представлена в следующей редакции:

$$S(t)=1+4\mu^2(1-\rho)\left[\frac{e^{s_1 t}}{s_1(s_1-s_2)}+\frac{e^{s_2 t}}{s_2(s_2-s_1)}\right].\quad(\text{П}6.40)$$

Можно показать, что $0\le S(t)\le 1$. Вычисление функции $S(t)$ для СМО вида $M/E_2/1$ по формулам (П6.37) и (П6.40) позволяет выбрать верхний предел суммирования по i так, чтобы ошибка находилась в разумных пределах. Подобные исследования целесообразно ограничить по оси "Время" величиной $5B^{(1)}$. За пределами этой величины функцию $S(t)$ лучше рассчитывать по приближенной формуле. Результаты вычислений показали, что при изменении нагрузки СМО от 0,1 до 0,9 первые пятнадцать слагаемых гарантируют ошибку не более 1%. Это вполне приемлемо для всех задач практического характера. Следует подчеркнуть, что речь идет об ошибке при вычислении дополнительной ФР.

Распределение $B(t)$, для упомянутой ранее системы вида $M/D+M/1$, может быть представлено в такой форме:

$$\beta(s)=\frac{\mu}{s+\mu}e^{-\tau s}.\quad(\text{П}6.41)$$

Необходимо провести преобразования, подобные тем, которые были выполнены для СМО $M/E_K/1$. При $t\le\tau$, как следует из формулы (П6.41), $S(t)=0$. Если $t>\tau$, то для расчета функции $S(t)$ используется следующее выражение [11]:

$$S(t)=(1-\rho)\mu\sum_{i=0}^{\left[\frac{t-\tau}{\tau}\right]}(-1)^i(\lambda\mu)^i\left[e^{\lambda(t-(i+1)\tau)}\right]G(t).\quad(\text{П}6.42)$$

Функция $G(t)$ рассчитывается по формуле, для которой предварительно необходимо вычислить коэффициенты H_j:

$$H_j=\frac{C_{i+j-1}^{i}}{(i+1-j)!(\lambda+\mu)^{i+j}},$$

$$G(t)=\sum_{j=1}^{i+1}H_j(t-(i+1)\tau)^{i+1-j}+(-1)^{i+1}e^{-\mu(t-(i+1)\tau)}\sum_{j=1}^{i+1}H_j(t-(i+1)\tau)^{i+1-j}.\quad(\text{П}6.43)$$

Последняя модель, рассматриваемая в этом разделе, представляет собой систему с равномерно распределенной длительностью обслуживания заявок на отрезке времени

$[0,\tau]$. Это распределение полезно, в частности, для описания процессов сканирования. Слово "равномерный" обычно переводится на английский язык как "uniform". Поэтому соответствующую СМО в классификации Кендалла можно обозначить так: $M/U/1$.

Анализ системы $M/U/1$ можно начать с функции $W(t)$ – распределения времени ожидания начала обслуживания. Выражения для данного распределения целесообразно представить в таком виде [12]:

$$W(t)=(1-\rho)\sum_{k=0}^{\infty}\rho^k\left\{\frac{1}{B^{(1)}}\int_0^t[1-B(x)]dx\right\}^{*(k)}. \qquad (П6.44)$$

Выражение в фигурных скобках удобно представить при помощи преобразования Лапласа-Стилтьеса. Такой подход позволяет упростить вычисление $k-$*кратной* свертки. Преобразование для функции $B(t)$ представимо в следующей редакции:

$$\beta(s)=\frac{1-e^{-\tau s}}{s\tau}. \qquad (П6.45)$$

Выражение в фигурных скобках – ФР остаточного времени обслуживания [1]. Для преобразования Лапласа-Стилтьеса этой функции справедлива такая формула:

$$\widehat{\beta}(s)=\frac{1-\beta(s)}{sB^{(1)}}=2\frac{\tau s-(1-e^{-\tau s})}{(\tau s)^2}. \qquad (П6.46)$$

В [13] получено выражение для $k-$*кратной* свертки преобразования Лапласа-Стилтьеса ФР остаточного времени обслуживания. После операций по возведению в степень k можно получить следующую формулу:

$$\left[\widehat{\beta}(s)\right]^k=2^k\sum_{i=0}^{k}C_k^i e^{-i\tau s}\sum_{j=0}^{k-i}\frac{(-1)C_{k-i}^j}{(\tau s)^{k+i+j}}. \qquad (П6.47)$$

Из этого выражения следует, что оригинал будет содержать слагаемые, которые включают множители такого вида [8]:

$$\frac{t^{n-1}}{(n-1)!}. \qquad (П6.48)$$

Эти множители будут сдвинуты по оси "Время" вправо в соответствии с теоремой смещения [8] на величину $i\tau$. После приведения подобных членов искомое выражение приобретает следующий вид:

$$W(t)=(1-\rho)\sum_{k=0}^{\infty}(2\rho)^k\sum_{i=0}^{k}C_k^i\Psi_+(t-i\tau)\sum_{j=0}^{k-1}\frac{(-1)^j C_{k-i}^j\left(\frac{t-i\tau}{\tau}\right)^{k+i+j}}{(k+i+j)!}. \qquad (П6.49)$$

Функция $S(t)$ – на основании формулы (П6.22) может быть представлена в такой форме:

$$S(t)=F(t)-\Psi_+(t-\tau)F(t-\tau),\quad где\quad F(t)=\frac{1}{\tau}\int_0^t W(x)dx. \qquad (П6.50)$$

После интегрирования искомое распределение $S(t)$ можно записать следующим образом:

$$S(t)=(1-\rho)\sum_{k=0}^{\infty}(2\rho)^k\sum_{i=0}^{k}C_k^i\Psi_+(t-i\tau)\sum_{j=0}^{k-1}\frac{(-1)^j C_{k-i}^j\left(\frac{t-i\tau}{\tau}\right)^{k+i+j+1}}{(k+i+j+1)!}. \qquad (П6.51)$$

Анализ этой функции в диапазоне $0,05\le\rho\le 0,95$ показал, что суммирование по k может быть ограничено пятнадцатью членами. В этом случае при $t\le 5B^{(1)}$ ошибка не превысит одного процента.

Наука – это истина, помноженная на сомнение.
(Поль Валери)

П6.3. Системы с произвольным характером входящего потока

Предположение о пуассоновском характере входящего потока заявок приемлемо для определенного класса систем электросвязи. Например, во втором Приложении приведены характеристики для выходящего потока заявок. Показано, что в большинстве случаев этот поток отличается от пуассоновского. Если он является входящим для другой СМО, то анализ вероятностно-временных характеристик усложняется. Задача упрощается только в одном случае: распределение $B(t)$ подчиняется экспоненциальному закону. Для СМО вида $G/M/1$ основные результаты могут быть получены численными методами.

Эта модель представляет теоретический и практический интерес по двум причинам. Во-первых, она позволяет изучать характеристики систем, на вход которых поступает поток заявок, отличающийся от пуассоновского. Во-вторых, ряд результатов анализа этой модели полезно сопоставить с соотношениями, полученными для систем вида $M/M/1$ и $M/G/1$.

Для получения характеристик модели $G/M/1$ необходимо сначала найти величину υ, которая в области $0<\upsilon<1$ является единственным корнем следующего уравнения [1]:

$$\upsilon=\alpha(\mu-\mu\upsilon). \qquad (П6.52)$$

Выражения для средних значений длительности ожидания и задержки, а также распределения $W(t)$ и $S(t)$ похожи на аналогичные формулы для модели вида $M/M/1$. Различие состоит в том, что вместо нагрузки ρ следует использовать переменную υ [1]:

$$W^{(1)}=\frac{\upsilon}{\mu(1-\upsilon)}, \qquad (П6.53)$$

$$S^{(1)}=\frac{1}{\mu(1-\upsilon)}, \qquad (П6.54)$$

$$W(t)=1-\upsilon e^{-(1-\upsilon)\mu t}, \qquad (П6.55)$$

$$S(t)=1-e^{-(1-\upsilon)\mu t}. \qquad (П6.56)$$

Несложно убедиться, что для пуассоновского входящего потока заявок решением уравнения (П6.52) будет $\upsilon=\rho$. В этом случае выражения (П6.53) – (П6.56) совпадают с аналогичными соотношениями, полученными для модели $M/M/1$. Наиболее интересен анализ СМО вида $G/G/1$. Для этой модели в [12] получены кумулянты $n-го$ порядка – W_n времени ожидания начала обслуживания:

$$W_n=\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{k}\int_0^{\infty}x^n dF^{(k)}(x). \qquad (П6.57)$$

Преобразование Лапласа-Стилтьеса функции $F(x)$, обозначаемое далее как $\varphi(s)$, определяется следующим образом:

$$\varphi(s) = \alpha(-s)\beta(s). \qquad (П6.58)$$

Получить кумулянты W_n для СМО вида $G/G/1$ преобразованием формулы (П6.57) невозможно. Для некоторых более простых моделей задача упрощается. В этом разделе кумулянты W_n и некоторые другие характеристики СМО выводятся для одной модели, представляющей практический интерес для пакетных сетей.

Предположим, что информация о функции $A(t)$ основана на результатах измерений. Пусть с некоторым периодом квантования, равным τ, определяются соответствующие величины приращений исследуемой функции – P_i. Если первое приращение функции $A(t)$ зафиксировано в точке $z\tau$, то ее преобразование Лапласа-Стилтьеса – $\alpha(s)$ можно записать в таком виде:

$$\alpha(s) = e^{-z\tau s}\sum_{i=0}^{m} P_i e^{-i\tau s}. \qquad (П6.59)$$

Величина m определяет ту точку на оси "Время", в которой обнаружено последнее приращение функции $A(t)$. Коэффициент вариации длительности интервалов между моментами поступлений соседних заявок – ν_A может меняться в широких пределах. Его истинное значение не сказывается на дальнейших преобразованиях.

Время обработки пакетов можно считать постоянной величиной, равной $B^{(1)}$. Эту величину удобно определять произведением $l\tau$. Заметим, что значение l не обязательно должно быть целым числом. Функцию распределения длительности обслуживания заявок – $B(t)$ удобно выражать через преобразование Лапласа-Стилтьеса:

$$\beta(s) = e^{-l\tau s}. \qquad (П6.60)$$

Предложенную модель в классификации Кендалла можно обозначить так: $HD/D/1$. Символ HD подчеркивает следующий факт: рассматривается распределение общего вида, но с возможными изменениями лишь в некоторые моменты времени $i\tau$ $\left(i = \overline{0, N}\right)$.

Для данной модели функция $\varphi(s)$, определяемая соотношением (П6.58), будет рассчитываться по такой формуле:

$$\varphi(s) = e^{(z-l)\tau s}\sum_{i=0}^{m} P_i e^{i\tau s}. \qquad (П6.61)$$

Введем коэффициенты $q_i(k)$, определяемые на основании правила возведения ряда в степень [14]:

$$q_i(k) = \begin{cases} P_0^k, \ \text{если } i = 0 \\ \dfrac{1}{ip_0}\sum\limits_{j=1}^{i}(jk - i + j)\cdot P_j \cdot q_{i-j}(k), \ \text{если } i = \overline{1, mk} \end{cases}. \qquad (П6.62)$$

В соотношение (П6.57) входит $k-$кратная свертка функции $F(x)$. Эта свертка (для преобразования Лапласа-Стилтьеса) вычисляется возведением правой части выражения (П6.61) в степень k [8]:

$$\left[\varphi(s)\right]^k = e^{k(z-l)\tau s}\sum_{i=0}^{km} q_i(k) e^{i\tau s}. \qquad (П6.63)$$

Используя функцию $\psi_+(x)$, введенную выше, выражение для расчета кумулянтов W_n можно представить в таком виде:

$$W_n^C = \tau^n \sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{k}\sum_{i=0}^{km} q_i(k)[i + k(z-l)]^n \psi_+[i + k(z-l)]. \qquad (П6.64)$$

Кумулянты W_1 и W_2 определяют среднее значение и дисперсию длительности ожидания заявок в очереди для СМО вида $HD/D/1$. Среднее значение времени задержки заявок $S^{(1)}$ и дисперсия этой величины σ_S^2 рассчитываются следующим образом:

$$S^{(1)} = W_1 + l\tau, \quad \sigma_S^2 = W_2. \qquad (П6.65)$$

Для вычисления значений $S^{(1)}$ и σ_S^2 необходимо выбрать верхний предел при суммировании по k, то есть заменить символ "∞" неким конечным значением M. Величина M определяется видом функции $A(t)$ и значением нагрузки СМО – ρ. Для расчета параметра ρ следует предварительно вычислить величины λ и μ:

$$\lambda = \frac{1}{z + \tau \sum_{i=0}^{m} iP_i}, \quad \mu = \frac{1}{l\tau}. \qquad (П6.66)$$

Если $\rho \geq 0,7$, то целесообразно использовать приближенные оценки, полученные для СМО вида $G/G/1$ при большой нагрузке [2]. Следовательно, применение метода, предложенного в этом разделе, будет полезным в таком диапазоне нагрузки: $0 < \rho < 0,7$. Именно для этой области изменения параметра ρ необходимо определить верхний предел суммирования по k. Численный анализ показывает, что при $0 < \rho < 0,7$ достаточно установить $m = 100$. Тогда для любых распределений $A(t)$ ошибки в расчете первых четырех кумулянтов не превысят одного процента. Сравнение результатов расчета $S^{(1)}$ и σ_S^2 в СМО вида $HD/D/1$ с аналогичными оценками для модели вида $M/D/1$ приведено в [15].

Кумулянты не позволяют получить ФР длительности задержки заявок в СМО. Тем не менее, они полезны для приближенной оценки квантилей распределения – t_p.

В рекомендации МСЭ Y.1541 [16] приведена методика оценки $0,999-го$ квантиля ФР длительности задержки IP-пакетов. Эти IP-пакеты правомерно рассматривать как заявки, поступающие в СМО. Задача, поставленная при разработке рекомендации Y.1541, заключалась в оценке квантиля для ФР длительности задержки заявок между ИПС. Это значит, что адекватной моделью служит СеМО. Подробнее модели СеМО будут рассматриваться в седьмом Приложении. Здесь мы ограничимся лишь использованием метода, предложенного МСЭ, для одной СМО.

Метод МСЭ предполагает, что сначала для каждой СМО оцениваются два основных параметра:

- математическое ожидание длительности задержки заявок – $S^{(1)}$;
- среднеквадратическое отклонение длительности задержки заявок – σ_S.

Далее вводится допущение, что для анализируемой СМО (например, в результате проведения измерений) получено значение квантиля t_p. Кроме того, для вероятности p определяется величина x_p. Она представляет собой значение квантиля для стандартного нормального распределения [17]. Используя эти параметры, можно оценить асимметрию исследуемой случайной величины – γ_1 [16]:

$$\gamma_1 \approx 6 \frac{x_p - \dfrac{t_p - S^{(1)}}{\sigma_S}}{1 - \left(x_p\right)^2}. \qquad (П6.67)$$

Кумулянты времени задержки заявок в СМО позволяют рассчитать величину γ_1 непосредственно. Тогда из формулы (П6.67) несложно найти квантиль t_p:

$$t_p \approx \sigma_S x_p + S^{(1)} - \frac{\sigma_S \gamma_1 \left(1 - x_p^2\right)}{6}. \qquad (П6.68)$$

Соотношение (П6.67), положенное в основу метода МСЭ, является приближенным. Погрешность, обусловленная использованием приближенных формул, в рекомендации Y.1541 не приводится. Следовательно, для применения выражения (П6.68) в практической работе необходимо оценить возникающие ошибки.

Для оценки ошибок при расчете квантиля t_p можно использовать такой подход. Для некоторой совокупности распределений вычисляются точные значения квантиля, которые сравниваются с оценкой, полученной из формулы (П6.68). При этом в качестве значения p выбирается одна из типичных величин, хотя метод, предложенный МСЭ, ориентирован на нормируемый показатель для ССП: $p = 0,999$. В таблице П6.4 приведены значения квантиля x_p для часто используемых значений вероятности p.

Таблица П6.4. Квантили нормального распределения

Вероятность p	0,5	0,9	0,95	0,99	0,999
Квантиль x_p	0	1,282	1,645	2,326	3,090

В таблицу П6.5 сведены результаты расчета квантилей по формуле (П6.68) и точные значения, взятые из справочника [17]. Вычислены и возникающие относительные ошибки. В качестве примеров взяты два распределения. Для обоих распределений $S^{(1)} = 1$.

Таблица П6.5. Квантили $t(p)$ и ошибки их вычисления по формуле (П6.68)

Значение вероятности p	Точное значение квантиля t_p	Приближенное значение квантиля t_p	Относительная ошибка
Экспоненциальное распределение при условии, что $S^{(1)} = 1$			
0,5	0,693	0,667	0,038
0,9	2,303	2,497	0,084
0,95	2,996	3,214	0,073
0,99	4,605	4,796	0,041
0,999	6,908	6,939	0,004
Параболическое распределение с параметрами $\alpha = 0$ и $\beta = 2$			
0,5	1,0	1,0	0,000
0,9	1,608	2,282	0,419
0,95	1,729299	2,645	0,530
0,99	1,882194	3,326	0,767
0,999	1,963259	4,090	1,083

Относительная ошибка оценки квантиля для экспоненциального распределения в диапазоне $0,999 \geq p \geq 0,9$ снижается. Для параболического распределения наблюдается противоположная зависимость. Пятидесятипроцентному квантилю соответствует нулевая ошибка. По мере роста вероятности p до уровня 0,999 ошибка монотонно возрастает.

Численные оценки, приведенные в таблице П6.5, а также полученные для ряда других распределений, позволяют сделать три важных вывода.

Во-первых, соотношение (П6.68), позволяющее оценивать квантили распределения длительности задержки на основе метода МСЭ, нельзя считать приемлемым для всех видов функции $S(t)$.

Во-вторых, предложенный подход позволяет с весьма высокой точностью оценивать квантили ряда распределений при условии, что $S(t) \geq 0,99$. При этом распределение $S(t)$

должно быть определено на всей положительной полуоси параметра "Время", то есть для конечного значения t всегда справедливо такое неравенство: $S(t) < 1$.

В-третьих, для распределений случайной величины с возможными значениями на ограниченном интервале параметра "Время" соотношение (П6. 68) дает приемлемые оценки только для квантилей, близких к медиане.

Следовательно, для распределений с возможными значениями на ограниченном интервале параметра "Время" целесообразно разработать другой метод для вычисления квантилей. Не исключено, что весьма продуктивным методом может стать аппроксимация функции $S(t)$ рядом Эджворта [4]. Можно разработать и другие методы расчета, которые позволят сразу же оценивать квантили, минуя аппроксимацию распределения $S(t)$.

Величина относительной ошибки при вычислении квантилей t_p определяется видом распределения и его параметрами. Для оценки относительной ошибки интересен анализ коэффициента вариации, который зависит от двух важных величин: среднее значение и дисперсия случайной величины. Выбор коэффициента вариации в качестве исследуемой характеристики объясняется тем, что он не имеет размерности и фактически представляет собой нормированную дисперсию.

На рисунке П6.5 приведена зависимость относительной ошибки в расчете квантиля t_p – δ от коэффициента вариации времени задержки заявок – v_S. Аппроксимацией ФР длительности задержки заявок служит распределение Вейбулла-Гнеденко [17]. Выбор этого распределения обусловлен тем, что для него величина коэффициента вариации изменяется в широких пределах.

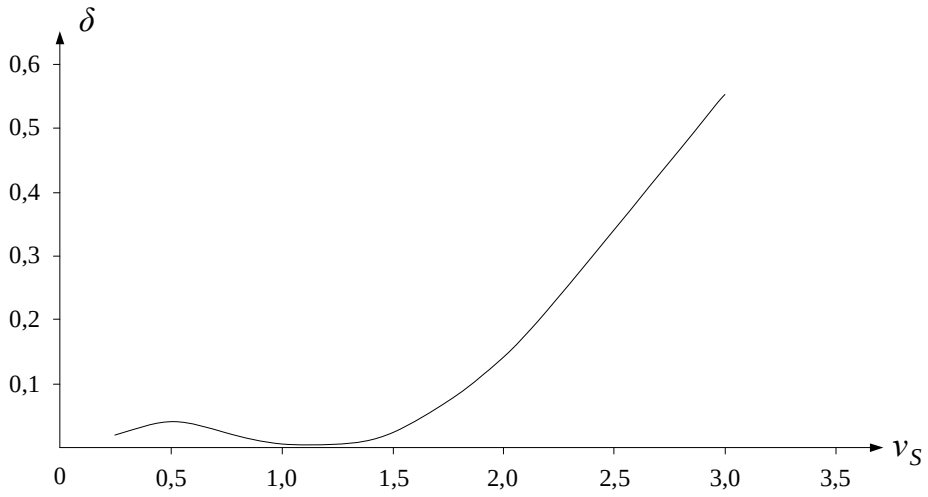


Рисунок. П6.5. Зависимость относительной ошибки δ от коэффициента вариации

Из графика следует, что в диапазоне изменения коэффициента вариации от нуля до (примерно) двух, относительная ошибка в оценке квантиля остается приемлемой для инженерных расчетов. Для распределений с высоким значением коэффициента вариации целесообразно разработать более точный метод расчета квантиля. Распределения такого рода, как показал ряд измерений трафика в современных телекоммуникационных сетях, типичны для некоторых видов услуг.

При исследовании некоторых видов СМО (в частности, проектируемых) невозможно провести измерения для получения функции $A(t)$, но относительно ее характера можно предложить обоснованную гипотезу. В подобных случаях функция $A(t)$ определяется одним из известных законов распределения случайных величин [4, 17]. Тогда можно предложить приближенный метод анализа СМО вида $G/D/1$ на основе результатов, полученных в [15, 18]. Метод основан на дискретизации функции $A(t)$ с неким периодом τ, что позволяет перейти к модели $HD/D/1$.

Для описания ступенчатой функции $A(t)$ удобно использовать ее преобразование Лапласа-Стилтьеса – формула (П6.59). Очевидно, что точность результатов исследования СМО при замене распределения $A(t)$ ступенчатой функцией будет зависеть от величины τ. С этой точки зрения рассматриваемая задача похожа на выбор периода дискретизации аналогового сигнала. Для определения требований к величине τ следует провести анализ нескольких моделей с разными видами функций $A(t)$.

В теории телетрафика часто используется модель с пуассоновским входящим потоком заявок с интенсивностью λ. На рисунке П6.6 показано распределение $A(t)$ и две ступенчатые функции – $A_1(t)$ и $A_2(t)$. Они позволяют оценивать верхнюю и нижнюю границы ряда параметров для систем с пуассоновским входящим потоком. В точке $k\tau$ приращения функций $A_1(t)$ и $A_2(t)$ определяются величинами P_k и Q_k соответственно. Заметим, что $P_0 = 0$.

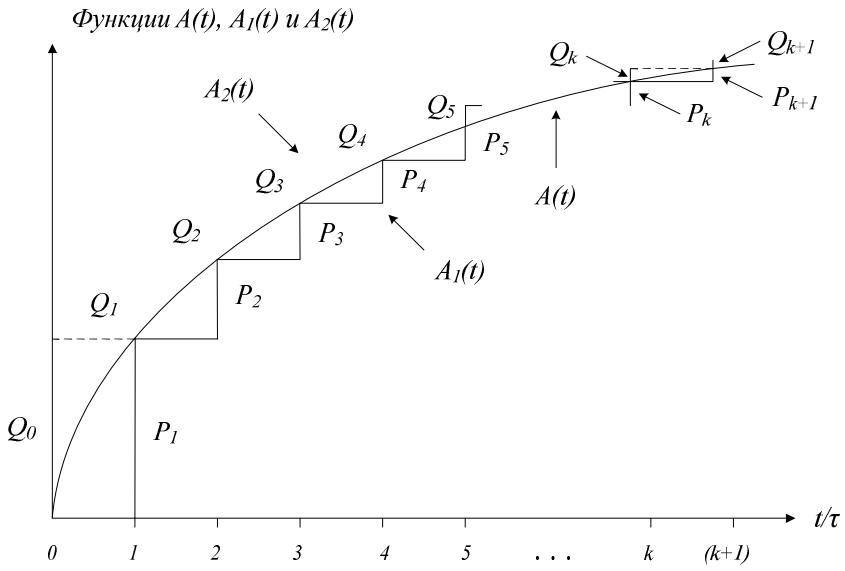


Рисунок П6.6. Две ступенчатые функции, заменяющие распределение $A(t)$

Величины P_k и Q_k для распределений $A_1(t)$ и $A_2(t)$ вычисляются по следующим формулам:

$$P_k = (e^{\lambda\tau} - 1)e^{-k\lambda\tau}, \quad Q_k = (e^{\lambda\tau} - 1)e^{-(k+1)\lambda\tau}. \qquad (П6.69)$$

Преобразования Лапласа-Стилтьеса этих двух ступенчатых функций – $\alpha_1(s)$ и $\alpha_2(s)$ связаны между собой простым соотношением:

$$\alpha_2(s) = \alpha_1(s)e^{\tau s}. \qquad (П6.70)$$

Введем также функцию $A_3(t)$, которая получается смещением ступенчатых функций $A_1(t)$ или $A_2(t)$ по оси абсцисс на $0{,}5\tau$ влево или вправо соответственно. Функции, подобные $A_3(t)$, формируются при выборе аппроксимирующей зависимости методом наименьших квадратов [4]. Преобразование Лапласа-Стилтьеса третьей функции – $\alpha_3(s)$ удобно выражать через формулы для изображений $\alpha_1(s)$ или $\alpha_2(s)$:

$$\alpha_3(s) = \alpha_1(s)e^{0{,}5\tau s} = \alpha_2(s)e^{-0{,}5\tau s}. \qquad (П6.71)$$

После подстановки выражений для расчета приращений P_k и Q_k функции $\alpha_1(s)$, $\alpha_2(s)$ и $\alpha_3(s)$ определяются как суммы членов геометрической прогрессии [4]:

$$\alpha_1(s)=\frac{\left(1-e^{-\lambda\tau}\right)e^{-s\tau}}{1-e^{-(\lambda+s)\tau}},\quad \alpha_2(s)=\frac{1-e^{-\lambda\tau}}{1-e^{-(\lambda+s)\tau}},\quad \alpha_3(s)=\frac{\left(1-e^{-\lambda\tau}\right)e^{-0,5\tau s}}{1-e^{-(\lambda+s)\tau}}. \qquad (П6.72)$$

По правилу нахождения моментов случайной величины $k-го$ порядка из формул для изображений ФР можно определить средние значения длительности интервалов между поступлениями заявок – $A_1^{(1)}$, $A_2^{(1)}$ и $A_3^{(1)}$:

$$A_1^{(1)}=\frac{\tau}{1-e^{-\lambda\tau}},\quad A_2^{(1)}=\frac{\tau e^{-\lambda\tau}}{1-e^{-\lambda\tau}},\quad A_3^{(1)}=\frac{\tau\left(1+e^{-\lambda\tau}\right)}{2\left(1-e^{-\lambda\tau}\right)}. \qquad (П6.73)$$

Это же правило позволяет определить второй момент, необходимый для расчета дисперсии. Как и следовало ожидать, для всех трех ступенчатых функций значения дисперсии (σ_1^2, σ_2^2 и σ_3^2) идентичны. По этой причине нижний индекс можно опустить, используя привычное обозначение – σ^2:

$$\sigma^2=\frac{\tau^2}{4sh\left(0,5\lambda\tau\right)}. \qquad (П6.74)$$

Для оценки квантилей ряда распределений используется коэффициент асимметрии [17] – γ_1. Следуя правилам расчета данного показателя [17] для трех рассматриваемых распределений, можно убедиться, что он одинаков:

$$\gamma_1=e^{0,5\lambda\tau}+e^{-0,5\lambda\tau}. \qquad (П6.75)$$

Выражения (П6.73) и (П6.74) позволяют вычислить коэффициенты вариации исследуемой случайной величины – ν_1, ν_2 и ν_3:

$$\nu_1=e^{-0,5\lambda\tau},\quad \nu_2=e^{0,5\lambda\tau},\quad \nu_3=\frac{2}{e^{0,5\lambda\tau}+e^{-0,5\lambda\tau}}. \qquad (П6.76)$$

При $\tau\to 0$ все три коэффициента вариации стремятся к единице. Можно показать, что при $\tau\to 0$ $A_1^{(1)}$, $A_2^{(1)}$ и $A_3^{(1)}$ стремятся к λ^{-1}, σ^2 – к λ^{-2}, ν_1, ν_2 и ν_3 – к единице, а γ_1 – к двойке. Значения λ^{-1}, λ^{-2}, "1" и "2" свойственны соответственно математическому ожиданию, дисперсии, а также коэффициентам вариации и асимметрии для случайной величины, которая подчиняется экспоненциальному закону распределения.

Для значений τ, отличных от нуля, существует относительная ошибка в оценке моментов случайной величины, которая обусловлена аппроксимацией распределения $A(t)$ ступенчатой функцией. Для функций $A_1(t)$, $A_2(t)$ и $A_3(t)$ эти ошибки обозначаются так: $\delta_1(j)$, $\delta_2(j)$ и $\delta_3(j)$. Переменная j идентифицирует ту характеристику случайной величины, для которой рассчитывается относительная ошибка.

Проще всего найти ошибки $\delta_1(\nu)$, $\delta_2(\nu)$ и $\delta_3(\nu)$ для коэффициентов вариации, так как точное значение этой характеристики для рассматриваемого распределения $A(t)$ равно единице. Несложно показать, что минимальной ошибкой является величина $\delta_3(\nu)$. Формулы для расчета ошибок $\delta_1(\nu)$, $\delta_2(\nu)$ и $\delta_3(\nu)$ представимы в следующей форме:

$$\delta_1(\nu)=1-e^{-0,5\lambda\tau},\quad \delta_2(\nu)=1-e^{0,5\lambda\tau},\quad \delta_3(\nu)=1-\frac{2}{e^{0,5\lambda\tau}+e^{-0,5\lambda\tau}}. \qquad (П6.77)$$

Для достаточно малых значений τ величина относительной ошибки оценивается слагаемым $0,5\lambda\tau$. Для доказательства этого утверждения функции $\delta_1(\nu)$, $\delta_2(\nu)$ и $\delta_3(\nu)$ следует разложить в ряд Маклорена [4]. Если задан уровень допустимой относительной

ошибки для оценки коэффициента вариации $\delta(\nu)$ и известен параметр λ, то для выбора величины τ справедливо такое неравенство:

$$\tau \le \frac{2\delta(\nu)}{\lambda}. \qquad \text{(П6.78)}$$

Определение требований к величине τ с учетом допустимой относительной ошибки при оценке средних значений исследуемой случайной величины связано с более громоздкими преобразованиями. После их выполнения несложно получить неравенство вида (П6.78) с одним отличием. Вместо сомножителя $\delta(\nu)$ в нем будет фигурировать величина допустимой относительной ошибки для оценки среднего значения длительности интервала между поступлениями соседних заявок – $\delta(A)$.

Величина коэффициента вариации представляет собой нормированную дисперсию. Это означает, что при использовании аппроксимаций (П6.72) для расчета двух основных характеристик исследуемой случайной величины (среднего значения и дисперсии) период τ выбирается из следующего неравенства:

$$\tau \le \frac{2\delta}{\lambda}. \qquad \text{(П6.79)}$$

Множитель δ в данном случае целесообразно рассматривать как допустимый уровень относительной ошибки при оценке среднего значения и дисперсии случайной величины, распределение которой подчиняется экспоненциальному закону. Несложно убедиться, что условие (П6.79) позволяет оценивать с заданной точностью и коэффициент асимметрии.

Соотношение (П6.79) получено при условии, что распределение $A(t)$ определяется экспоненциальным законом. Ниже будет показано, что вид функции $A(t)$ не столь важен, но сначала целесообразно проанализировать корректность условия (П6.79) для класса распределений на ограниченном интервале времени.

Исследование возникающих ошибок для функций $A(t)$, заданных на ограниченном интервале времени, можно провести на примере равномерного закона распределения длительности интервалов между моментами поступления заявок [17]. На рисунке П6.7 показано такое распределение $A(t)$ на нормированном к τ интервале времени от 0 до $(n-1)$. Ступенчатая функция $A_3(t)$ имеет одинаковые приращения в точках $k\tau$, равные n^{-1}.

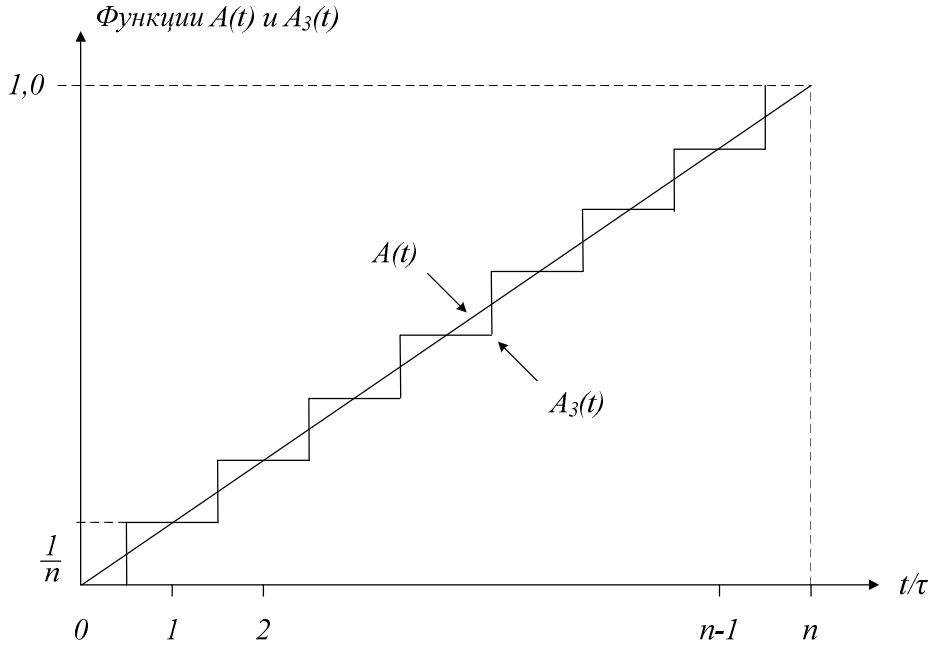


Рисунок П6.7. Равномерное распределение и его аппроксимация

Для исследуемой функции $A(t)$ среднее значение длительности интервалов между моментами поступления заявок $A^{(1)}$, дисперсию σ^2 и коэффициент вариации ν можно вычислить по хорошо известным формулам [17]:

$$A^{(1)} = \frac{n\tau}{2}, \quad \sigma^2 = \frac{n^2\tau^2}{12}, \quad \nu = \frac{1}{\sqrt{3}}. \qquad \text{(П6.80)}$$

В качестве ступенчатой функции $A(t)$ целесообразно использовать распределение, которое соответствует третьему виду функции, введенному для предыдущей модели. Для ступенчатой функции вида $A_3(t)$ исследуемые характеристики (они снабжены нижним индексом "3") вычисляются по таким формулам [17]:

$$A_3^{(1)} = \frac{(n-1)\tau}{2}, \quad \sigma_3^{(2)} = \frac{(n^2-1)\tau^2}{12}, \quad \nu_3 = \frac{\sqrt{n^2-1}}{\sqrt{3}(n-1)}. \qquad \text{(П6.81)}$$

Коэффициенты асимметрии для обоих распределений равны нулю. По этой причине соответствующие ошибки далее не рассматриваются. Относительная ошибка при оценке среднего значения исследуемой случайной величины $\delta(A)$ определяется следующим образом:

$$\delta(A) = \frac{A^{(1)} - A_3^{(1)}}{A^{(1)}} = 0,5\lambda\tau. \qquad \text{(П6.82)}$$

Это означает, что величина τ должна выбираться из неравенства (П6.79), которое было получено для другого закона распределения исследуемой случайной величины. Можно показать, что соблюдение условия (П6.79) приводит к выбору меньшего значения τ, чем те неравенства, из которых вычисляются ошибки для σ^2 или ν. Иными словами, для равномерного закона распределения $A(t)$ выбор величины τ должен осуществляться на основе неравенства (П6.79).

Третий пример связан с распределениями, для которых коэффициент вариации длительности интервалов между моментами поступления заявок превышает единицу. На профессиональном сленге они называются распределениями с "тяжелыми хвостами" [19]. Одним из удачных – с точки зрения простоты последующего анализа – примеров такого распределения следует считать гиперэкспоненциальное. Для гиперэкспоненциального распределения второго порядка [17] с параметром формы – p преобразование Лапласа-Стилтьеса ФР длительности интервалов между поступлениями заявок – $\alpha(s)$ представимо в таком виде:

$$\alpha(s) = p\frac{2p\lambda}{s+2p\lambda} + (1-p)\frac{2(1-p)\lambda}{s+2(1-p)\lambda}. \qquad \text{(П6.83)}$$

Математическое ожидание времени между моментами поступления заявок – $A^{(1)}$ связано с величиной интенсивности потока заявок – λ соотношением (П2.6). При замене гиперэкспоненциального распределения дискретным с отсчетами, взятыми с периодом τ, целесообразно использовать функцию вида $A_3(t)$. Для нее среднее значение времени между моментами поступления заявок – $A_3^{(1)}$ может быть получено в таком виде:

$$A_3^{(1)} = \frac{\tau p\left(1+e^{-2p\lambda\tau}\right)}{2\left(1-e^{-2p\lambda\tau}\right)} + \frac{\tau(1-p)\left(1+e^{-2(1-p)\lambda\tau}\right)}{2\left(1-e^{-2(1-p)\lambda\tau}\right)}. \qquad \text{(П6.84)}$$

Относительную ошибку оценки $A^{(1)}$ целесообразно исследовать как функцию $f(p,\lambda,\tau)$, которая зависит от трех параметров – p, λ и τ:

$$f(p,\lambda,\tau)=1-\lambda\tau\frac{p\left(1+e^{-2p\lambda\tau}\right)\left(1-e^{-2(1-p)\lambda\tau}\right)+(1-p)\left(1+e^{-2(1-p)\lambda\tau}\right)\left(1-e^{-2p\lambda\tau}\right)}{2\left(1-e^{-2p\lambda\tau}\right)\left(1-e^{-2(1-p)\lambda\tau}\right)}. \quad (П6.85)$$

На рисунке П6.8 приведены графики функций $f(p,\lambda,\tau)$, построенные для двух значений τ в диапазоне изменений параметра формы от 0,01 до 0,49 при $\lambda=1$. Выбор такого диапазона обусловлен тем, что распределение вида (П6.83) определено при условии, что $0<p<0,5$.

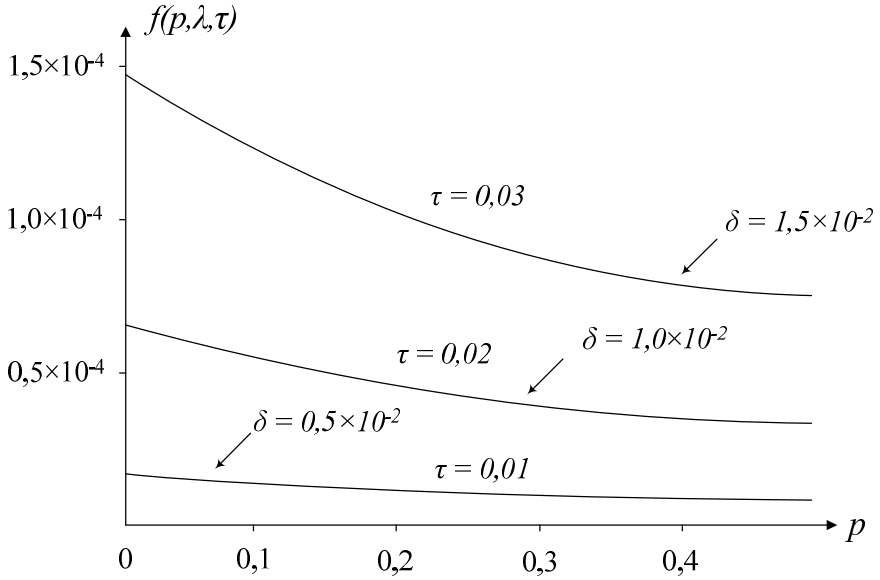


Рисунок П6.8. Зависимость относительной ошибки $f(p,\lambda,\tau)$ от параметра формы p

Для каждой кривой указаны также значения относительной ошибки, вычисленные на основании соотношения (П6.79): $\delta=0,5\lambda\tau$. Очевидно, что $f(p,\lambda,\tau)<<\delta$. Данный факт объясняется характером изменений функции $A(t)$. Распределения с "тяжелыми хвостами" с ростом t приближаются к единице не столь быстро, как, например, экспоненциальное. По этой причине отсчеты, взятые с периодом τ, который вычислен по формуле (П6.79), более точно представляют ФР. Из этого следует вывод о том, что соотношение (П6.79) вполне приемлемо для распределений с "тяжелыми хвостами". Можно показать, что данный вывод справедлив и для оценок других параметров ФР длительности интервалов между моментами поступления заявок. Соответствующие формулы очень громоздки и в этом Приложении не приводятся.

Возможность исследования СМО посредством дискретизации ФР длительности интервалов между моментами поступления заявок, для которой величина коэффициента вариации превышает (иногда – весьма существенно) единицу, позволяет анализировать процессы функционирования мультисервисных сетей. Именно для сетей такого рода характерны распределения с "тяжелыми хвостами" [19].

Сформулированное условие для выбора величины τ приемлемо для получения численных характеристик функции $A(t)$. Необходимо определить подобное условие для моментов времени задержки. С практической точки зрения интерес представляют среднее значение времени задержки $S^{(1)}$ и дисперсия этой случайной величины σ_S^2. Вместо дисперсии можно использовать коэффициент вариации ν_S.

Если функция $A(t)$ определяется законом (П2.8), то рассматриваемой моделью служит система вида $M/D/1$. Для нее известны выражения, позволяющие рассчитать $S^{(1)}$, σ_S^2 и ν_S. Они приведены, например, в [1]. Для компактной записи этих выражений следует использовать параметр нагрузки – ρ.

С учетом соотношения (П6.60) интенсивность обслуживания заявок будет равна $(l\tau)^{-1}$. Тогда формулы для вычисления характеристик $S^{(1)}$, σ_S^2 и ν_S можно представить в следующей редакции:

$$S^{(1)} = \frac{2-\rho}{2[1-\rho]} l\tau, \qquad \sigma_S^2 = \frac{\rho(4-\rho)}{12(1-\rho)^2}(l\tau)^2, \quad \nu_S = \frac{\sqrt{\rho(4-\rho)}}{\sqrt{3}(2-\rho)}. \qquad \text{(П6.86)}$$

При использовании ступенчатых функций для аппроксимации распределения $A(t)$ оценки $S^{(1)}$, σ_S^2 и ν_S приведены выше. Эти оценки вместе с результатами, полученными при расчетах по формулам (П6.86), позволяют определить то максимальное значение τ, для которого относительная ошибка в оценке исследуемых характеристик времени задержки заявок не превышает установленный порог δ.

Проведенные вычисления показали, что величина τ зависит от нагрузки ρ. Для задач проектирования технических средств, исследуемых как СМО, интересен диапазон нагрузки от 0,1 до 0,7. Именно для таких значений ρ целесообразно оценить величину относительной ошибки, возникающей при расчетах параметров времени задержки заявок. В перечень исследуемых параметров этой случайной величины целесообразно включить среднее значение и коэффициент вариации. Эти два параметра часто используются для оценки показателей качества обслуживания в СМО.

В формулы (П6.86) входит величина нагрузки ρ, а неравенство (П6.79) получено для интенсивности потока заявок λ. Целесообразно предположить, что длительность обслуживания заявок равна единице. Тогда – численно (!) – значения ρ и λ будут совпадать.

Результаты вычисления ошибок, возникающих при оценке исследуемых параметров времени задержки заявок, приведены в таблице П6.6. Величина τ определялась из формулы (П6.28) при условии, что $\delta = 2,5\%$. Полученные результаты свидетельствуют, что в выбранном диапазоне изменений нагрузки ошибка при оценке двух исследуемых параметров времени задержки заявок не превышает порога $\delta = 2,5\%$. Это значение допустимой ошибки было использовано для выбора периода дискретизации функции $A(t)$. Следовательно, условие (П6.79) можно считать достаточным и для приближенного анализа параметров времени задержки заявок в однолинейных СМО с постоянным временем обслуживания заявок.

Таблица П6.6. Относительные ошибки в оценке параметров времени задержки заявок

Ошибка при расчете:	$\rho = 0,1$	$\rho = 0,3$	$\rho = 0,5$	$\rho = 0,7$
– среднего значения	0,010	0,002	0,001	0,011
– коэффициента вариации	0,009	0,006	0,003	0,015

Следует упомянуть о приближениях для системы $G/G/1$ [2, 12, 20, 21]. Они, в основном, позволяют судить о поведении среднего значения времени задержки. При $\rho > 0,9$ среднее значение времени ожидания заявок в очереди (кумулянт первого порядка) может рассчитываться по такой приближенной формуле:

$$W^{(1)} \approx \frac{\lambda\left(\sigma_A^2 + \sigma_B^2\right)}{2(1-\rho)}. \qquad \text{(П6.87)}$$

Более точное приближение позволяет получить формула Мэрчэла. Она эффективна при значениях ν_A, близких к единице:

$$W^{(1)} \approx \frac{1+\nu_B^2}{\frac{1}{\rho^2}+\nu_B^2}\frac{\lambda\left(\sigma_A^2+\sigma_B^2\right)}{2(1-\rho)}. \qquad (П6.88)$$

В области нагрузки СМО $0,7 \le \rho < 0,9$ хорошее приближение для среднего значения длительности ожидания в очереди получено Кремером и Лангельбах-Бельцем:

$$W^{(1)} \approx \frac{\rho B^{(1)}}{2(1-\rho)}\left(\nu_A^2+\nu_B^2\right)\times\begin{cases}\exp\left[-\dfrac{2(1-\rho)\left(1-\nu_A^2\right)^2}{3\rho\left(\nu_A^2+\nu_B^2\right)}\right] & при\ \nu_A^2 \le 1\\ \exp\left[-\dfrac{(1-\rho)\left(\nu_A^2-1\right)}{\nu_A^2+4\nu_B^2}\right] & при\quad \nu_A^2 > 1\end{cases}. \qquad (П6.89)$$

Для оценки дисперсии времени ожидания заявок в очереди – σ_W^2 целесообразно воспользоваться следующей приближенной формулой:

$$\sigma_W^2 \approx \frac{\lambda^2(\sigma_A^2+\sigma_B^2)}{4(1-\rho)^2}. \qquad (П6.90)$$

Кроме приближений (П6.87) – (П6.90) для некоторых моделей предложены и другие соотношения. В частности, для получения ФР времени ожидания начала обслуживания известна уже упоминавшаяся формула, предложенная в [10]. Следует подчеркнуть, что каждому приближению соответствует область использования, для которой полученным оценкам присуща приемлемая точность.

В [22, 23] показано, что использование приближений (П6.87) – (П6.90) для моделей вида $HD/D/1$ не всегда приводит к приемлемым для практики результатам. По этой причине целесообразно ориентироваться на тот метод оценки вероятностно-временных характеристик, который приведен в данном разделе шестого Приложения.

Десять заповедей лишь потому так лаконичны, ясны и понятны,
что были написаны без помощи советников и экспертов.
(*Шарль де Голль*)

П6.4. Однолинейные системы с относительными приоритетами

В современных IP-сетях предусмотрена возможность назначения относительных приоритетов некоторым видам пакетов. В этом случае возникает ряд задач по расчету характеристик СМО с учетом двух упомянутых выше нормируемых показателей качества обслуживания для пакетов $i-го$ приоритета. Если назначается N уровней приоритета, то $i=\overline{1,N}$.

Исследование СМО с приоритетным обслуживанием связано с решением сложных задач. Обычно оценки вероятностно-временных характеристик можно получить только для простых моделей с пуассоновским входящим потоком. Более того, перечень этих характеристик часто ограничивается средним значением времени задержки заявок $i-го$ приоритета. Для сложных моделей с произвольным видом распределения $A(t)$ анализ вероятностно-временных характеристик обычно выполняется при помощи имитационного моделирования. Этот подход малоэффективен при решении задач, которые связаны с определением параметров модели по заданным показателям качества обслуживания.

В данном разделе изложена суть приближенного метода оценки этих параметров [24] для пакетов высшего (первого) относительного приоритета, для которых $i=1$. Можно ввести три оценки нормируемых показателей: оптимистическую, пессимистическую и

прагматическую. По этой причине в скобках – после нормируемых показателей – будет указываться характер оценки при помощи сокращения: opt, pes и pra соответственно.

Результаты [15, 18, 25] справедливы для СМО вида $HD/D/1$. Соотношения, приведенные в [15, 18], позволяют получить оптимистические оценки для исследуемых характеристик качества обслуживания, так как не учитывают дополнительную задержку, вносимую заявками низших приоритетов. Допустим, что приоритетная заявка поступает в СМО в момент времени t_1. В этот момент времени в обслуживающем приборе не обрабатывается неприоритетная заявка. Тогда все результаты, полученные для модели $G/D/1$, можно использовать как оптимистические оценки.

Пессимистические оценки соответствуют той ситуации, когда приоритетная заявка поступает в СМО в момент времени t_2. Пусть в данный момент времени заявка низшего приоритета только начинает обслуживаться. Это позволяет, зная максимальное время обслуживания заявок низшего приоритета x (а оно для пакетных сетей может считаться постоянным), достаточно просто оценить изменение рассматриваемых параметров задержки. Для получения пессимистических оценок следует дополнить исследуемую модель предварительным обслуживанием заявок в СМО вида $HD/D/\infty$. Время задержки в такой системе равно длительности обслуживания заявок x. По этой причине во второй позиции классификации Кендалла поставлен символ D.

Можно получить прагматические (более точные) оценки характеристик качества обслуживания за счет модели с бункером на входе, предложенной в [26]. В классификации Кендалла данную модель можно представить так: $HD,Б/D/1$. Буква "$Б$" указывает на наличие бункера, а символ D подчеркивает то обстоятельство, что обслуживание заявок из бункера также осуществляется за постоянное время, равное x. Если в системе нет заявок, связанных с полезной информацией, то из бункера (его емкость полагается бесконечной) извлекается заявка, обслуживание которой не прерывается.

На рисунке П6.9 показано поведение гипотетической ФР длительности задержки заявок первого относительного приоритета $S(t)$. Ее $p-$квантиль определяется в той точке на оси времени, для которой $S(t)=p$. Очевидно, что всегда справедливо следующее неравенство: $t_P(opt) \le t_P(pra) \le t_P(pes)$.

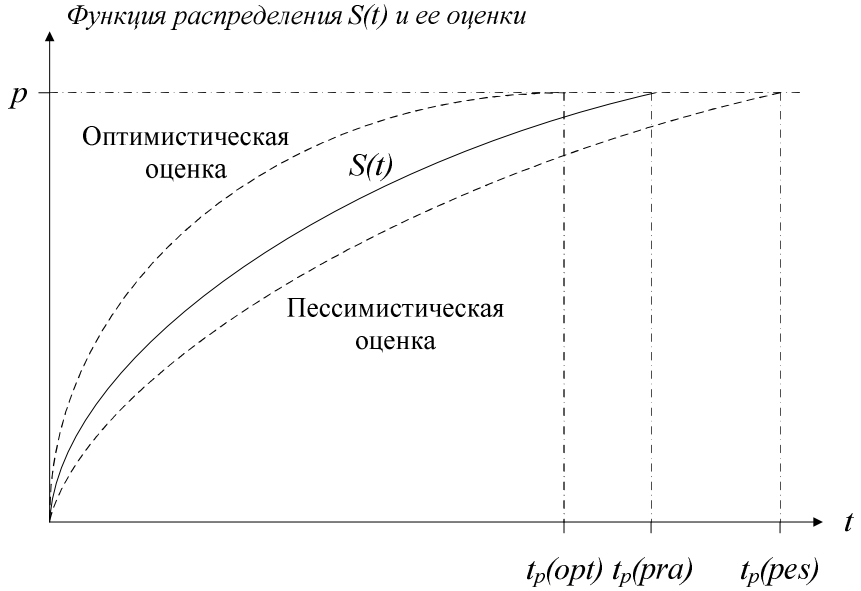


Рисунок П6.9. Пример распределения длительности задержки заявок

Очевидно, что значение $S^{(1)}(pes)$ определяется прибавлением к величине $S^{(1)}$ максимального времени обслуживания пакетов, которые не относятся к заявкам первого приоритета:

$$S^{(1)}(pes) = S^{(1)} + x. \qquad (П6.91)$$

Квантиль $t_P(pes)$ можно оценивать по формуле, предложенной в рекомендации МСЭ Y.1541 [16]:

$$t_P(pes) \approx S^{(1)}(pes) + \sigma(pes)\left\{x_P - \frac{\gamma_1(pes)\left[1-(x_P)^2\right]}{6}\right\}. \qquad (П6.92)$$

Во второе слагаемое этой формулы входят три переменные: среднеквадратическое отклонение времени задержки $\sigma(pes)$, коэффициент асимметрии этой же случайной величины $\gamma_1(pes)$ и $p-$квантиль для стандартного нормального распределения x_P. Для анализируемой модели, которая представляет собой двухфазную СМО, необходимо найти переменные $\sigma(pes)$ и $\gamma_1(pes)$. Величина x_P определяется из таблиц для нормального закона распределения случайной величины.

Очевидно, что для СМО вида $HD/D/\infty$ дисперсия времени задержки заявок всегда равна нулю. Это означает, что значение $\sigma_S(pes)$ численно равно величине σ_S, которое определяет среднеквадратическое отклонение времени задержки в СМО вида $G/D/1$. Выражения для оценки величины σ_S приведены в [15].

Для вычисления коэффициента асимметрии $\gamma_1(pes)$ можно предложить алгоритм, который состоит из нескольких шагов. Предлагаемый алгоритм будет использован и для получения прагматической оценки. Поэтому целесообразно опустить сокращения pes и pra.

Первый шаг – нахождение трех начальных моментов времени задержки заявок. Введем следующие обозначения:

- $Z(t)$ – функция распределения времени задержки заявок в двухфазной СМО;
- $\zeta(s)$ – преобразование Лапласа-Стилтьеса функции $Z(t)$;
- $Z^{(i)}$ – $i-й$ начальный момент времени задержки заявок в двухфазной СМО;
- $S(t)$ – функция распределения времени задержки заявок на первой фазе;
- $\xi(s)$ – преобразование Лапласа-Стилтьеса функции $S(t)$;
- $S^{(i)}$ $-i-й$ начальный момент времени задержки заявок на первой фазе;
- $P(t)$ – функция распределения времени задержки заявок на второй фазе;
- $\pi(s)$ – преобразование Лапласа-Стилтьеса функции $P(t)$;
- $P^{(i)}$ – $i-й$ начальный момент времени задержки заявок на второй фазе.

Вид функции распределения $S(t)$ не столь существенен, так как во всех расчетах используются только моменты $S^{(i)}$. Для получения пессимистической оценки введено предположение, что время задержки постоянно и равно x. Это означает, что

$$\pi(s) = e^{-xs}. \qquad (П6.93)$$

В общем виде преобразование Лапласа-Стилтьеса $\zeta(s)$ определяется следующим произведением [8]:

$$\zeta(s) = \xi(s)\pi(s). \qquad (П6.94)$$

Для нахождения трех моментов $Z^{(i)}$ целесообразно воспользоваться правилом их получения из функции $\zeta(s)$ [8]. В результате несложно получить следующие выражения:

$$Z^{(1)} = S^{(1)} + P^{(1)}.$$

$$Z^{(2)} = S^{(2)} + 2S^{(1)}P^{(1)} + P^{(2)}. \qquad (П6.95)$$

$$Z^{(3)} = S^{(3)} + 3S^{(2)}P^{(1)} + 3S^{(1)}P^{(2)} + P^{(3)}.$$

Второй шаг заключается в нахождении второго и третьего центральных моментов времени задержки заявок – μ_2 и μ_3. Величина μ_2 – дисперсия времени задержки заявок. Чаще она обозначается как σ^2. Используя соотношения, связывающие между собой начальные и центральные моменты [17], получаем:

$$\sigma^2 = \sigma_S^2 + \sigma_P^2,$$

$$\mu_3 = S^{(3)} + P^{(3)} - 3S^{(1)}S^{(2)} - 3P^{(1)}P^{(2)} + 2\left(S^{(1)}\right)^3 + 2\left(P^{(1)}\right)^3. \qquad (П6.96)$$

Третий шаг – вычисление искомого коэффициента асимметрии γ_1 по известной формуле [17]:

$$\gamma_1 = \frac{\mu_3}{\sigma^3}. \qquad (П6.97)$$

Для исследуемой модели время задержки заявок на первой фазе детерминировано. Это означает, что $P^{(i)} = x^i$, а $\sigma_P = 0$. Эти два соотношения следует учитывать при расчете $\gamma_1(pes)$. Таким образом, все величины для расчета пессимистических оценок $S^{(1)}(pes)$ и $t_P(pes)$ известны.

Заявка, поступающая в СМО с бункером на входе, задерживается, в среднем, на такое время [26]:

$$S^{(1)}(pra) = S^{(1)} + \frac{x}{2}. \qquad (П6.98)$$

Эта формула позволяет рассматривать прагматическую оценку времени задержки заявок как среднее арифметическое, получаемое из аналогичных величин, которые были названы оптимистической и пессимистической:

$$S^{(1)}(pra) = \frac{S^{(1)}(opt) + S^{(1)}(pes)}{2}. \qquad (П6.99)$$

С другой стороны, выражение (2) можно трактовать иначе. СМО с бункером на входе можно заменить двухфазной системой. Моделью первой фазы становится СМО вида $HD/U/\infty$. Символ U (от термина "uniform" в английском языке) указывает на равномерное распределение времени обслуживания заявок. Теперь необходимо получить среднеквадратическое отклонение $\sigma(pra)$ и третий центральный момент $T_3(pra)$ для времени задержки заявок в двухфазной СМО.

Выражение для $\sigma(pra)$ можно получить на основании правила расчета дисперсии суммы двух случайных величин [1]. Для исследуемой двухфазной модели это выражение представимо в таком виде:

$$\sigma_S(pra) = \sqrt{\sigma_S^2 + \frac{x^2}{12}}. \qquad (П6.100)$$

При вычислении третьего центрального момента $\mu_3(pra)$ следует учитывать, что для равномерного закона распределения начальные моменты $i-го$ порядка определяются следующим образом [17]:

$$P^{(i)} = \frac{x^i}{i+1}. \qquad (П6.101)$$

Квантиль $t_P(pra)$ оценивается на основании соотношения (П6.92). В него должны подставляться значения $S^{(1)}(pra)$, $\sigma(pra)$ и $\gamma_1(pra)$:

$$t_P(pra) \approx S^{(1)}(pra) + \sigma(pra)\left\{x_P - \frac{\gamma_1(pra)\left[1-(x_P)^2\right]}{6}\right\}. \qquad (П6.102)$$

Итак, все выражения для оценки характеристик качества обслуживания в пакетных сетях получены. Область использования полученных оценок целесообразно оценить при помощи имитационного моделирования. Результаты моделирования ценны еще по одной причине. Использование соотношения для расчета квантиля, которое приведено в [16], иногда приводит к заметным ошибкам. В частности, если распределение длительности задержки заявок ограничено интервалом (α, β), то вычисления квантиля по методике МСЭ в некоторых случаях приводят к значению $t_P > \beta$. Это противоречит естественному ограничению: $t_P \le \beta$. Примеры, когда расчеты по методу МСЭ приводили к неравенству $t_P > \beta$, были получены для равномерного и параболического распределений исследуемой величины. Для обоих распределений все вычисления проводились при условии, что $S(t_P) = 0{,}999$.

При имитационном моделировании был использован ряд законов распределения интервалов между моментами поступления заявок. Большинство законов распределения выбиралось при условии, чтобы коэффициент вариации был больше единицы. Подобная ситуация обычно характерна для мультисервисного трафика [19]. В качестве модели, которая позволяет проверить приведенные выше результаты, была использована СМО вида $G_1, G_2 / D_1, D_2 / 1 / r / f_0^1$. Эта запись означает следующее:

- на вход системы поступают два потока заявок с произвольными законами распределения $A_1(t)$ и $A_2(t)$;
- величины времени обслуживания заявок τ_1 и τ_2 постоянны и могут быть разными для обоих потоков (то есть, в общем случае $\tau_1 \ne \tau_2$);
- в системе используется один обслуживающий прибор;
- количество мест для ожидания начала обслуживания равно r;
- заявки первого потока обслуживаются по алгоритму выбора из очереди с относительным приоритетом.

Количество возможных вариантов для реализации модели $G_1, G_2 / D_1, D_2 / 1 / r / f_0^1$ очень велико. По этой причине были выбраны ограничения, определяемые природой трафика в мультисервисной сети, которая построена на IP-технологиях. Такое допущение позволяет считать, что $\tau_1 = \tau_2$ и потери IP-пакетов отсутствуют. Статистические оценки объема трафика речи и данных (соответствующим IP-пакетам назначается первый и второй приоритет), позволяют ввести соотношение между величинами интенсивности входящего потока λ_1 и λ_2 как $1:4$.

Значения нагрузки ρ_1 и ρ_2, создаваемой заявками первого и второго приоритетов, определяются очевидными соотношениями:

$$\rho_1 = \lambda_1 \tau_1, \quad \rho_2 = \lambda_2 \tau_2. \qquad (П6.103)$$

Целесообразно ввести суммарную нагрузку СМО ρ, которая равна сумме $\rho_1 + \rho_2$. Соотношение между величинами ρ_1 и ρ_2 будет таким же, как и между значениями λ_1 и λ_2.

В таблице П6.7 приведены значения исследуемых параметров величин времени задержки приоритетных пакетов для разных значений нагрузки ρ. Для этих величин – по аналогии с используемыми в данном разделе – введены обозначения $S^{(1)}(mod)$, $t_P(mod)$. В таблице указаны также относительные ошибки $\delta(S)$ и $\delta(t_P)$, возникающие при использовании соответствующих прагматических оценок. Значения $S^{(1)}(pra)$, $t_P(pra)$, $\delta(S)$ и $\delta(t_P)$ приведены до знака "/". О величинах, приведенных после этого знака, будет сказано ниже. Величина коэффициента вариации для модели была выбрана равной двум. Величины исследуемых параметров были нормированы относительно среднего времени обслуживания IP-пакетов.

Таблица П6.7. Исследуемые параметры времени задержки приоритетных пакетов

Нагрузка СМО ρ	Оценки для среднего значения:			Оценки 99,9% квантиля:		
	$S^{(1)}(pra)$	$S^{(1)}(mod)$	$\delta(S)$	$t_P(pra)$	$t_P(mod)$	$\delta(t_P)$
0,10	1,520 / 1,000	1,057	0,438 / 0,054	2,835 / 1,866	2,283	0,242 / 0,183
0,25	1,544 / 1,158	1,151	0,341 / 0,006	3,267 / 3,267	2,797	0,168 / 0,124
0,50	1,595 / 1,361	1,331	0,198 / 0,023	3,744 / 3,196	3,432	0,091 / 0,069
0,75	1,656 / 1,545	1,527	0,084 / 0,012	3,977 / 3,711	4,097	0,029 / 0,094
0,95	1,715 / 1,693	1,689	0,015 / 0,003	4,702 / 4,642	4,573	0,028 / 0,015

С ростом нагрузки уменьшается относительная ошибка и для среднего значения времени задержки приоритетных пакетов, и для квантиля распределения этой случайной величины. Причем, прагматическая оценка позволяет определить верхнюю границу обоих параметров качества обслуживания мультисервисного трафика. Прагматические оценки $S^{(1)}(pra)$ и $t_P(pra)$ можно уточнить, помножив их на множитель η, который был выбран эмпирически:

$$\eta = \frac{1+\sqrt{\rho}}{2}. \qquad (П6.104)$$

Значения $S^{(1)}(pra)$, $t_P(pra)$, $\delta(S)$ и $\delta(t_P)$, указанные в первой таблице после знака "/", соответствуют скорректированным величинам, полученным за счет использования множителя η. Сравнение значений относительных ошибок $\delta(S)$ и $\delta(t_P)$ позволяет сделать вывод о целесообразности использования поправки (П6.104). Она становится особенно эффективной для расчета среднего значения времени задержки приоритетных пакетов.

При оценке величин $\delta(S)$ и $\delta(t_P)$ результаты моделирования рассматривались как эталонные значения исследуемых параметров времени задержки. Такой подход можно считать приемлемым при небольших величинах доверительных интервалов [27]. Это условие достигается при проведении значительного объема испытаний. Величина $t_P(pra)$ нормируется для значения функции распределения времени задержки, равной 0,999. Это означает, что необходимо собрать статистику событий, встречающихся с вероятностью 0,001. Использование методики оценки вероятности по частоте, которая приведена в [27], позволило рассчитать объем испытаний n. Для доверительной вероятности 0,95 оценка $t_P(pra)$ с погрешностью $\pm 10\%$ достигается при $n > 400000$.

Предложенный подход позволяет получить приближенные оценки двух важных показателей качества обслуживания в пакетных сетях: среднего времени задержки пакетов и

квантиля функции распределения этой же случайной величины. Величина ошибки при расчете обоих показателей находится в разумных пределах.

При выборе алгоритма обмена IP-пакетами в ССП важной задачей считается оценка эффективности различных дисциплин обработки в узлах коммутации. С практической точки зрения целесообразно сравнить две основные дисциплины обработки IP-пакетами: в порядке поступления (FIFO) и с относительными приоритетами. Этот анализ может быть выполнен при помощи двух моделей однолинейных СМО. Первая система обслуживает трафик с интенсивностью $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$, а время обслуживания заявок постоянно – τ. Во второй системе трафику с интенсивностью λ_1 присвоен первый приоритет. Для СМО первого вида известны выражения для расчета среднего значения длительности задержки заявок и дисперсии этой величины, если входящий поток заявок можно рассматривать как пуассоновский [1]. Для исследуемой модели соответствующие формулы представимы в такой редакции:

$$S^{(1)} = \frac{2-(\rho_1+\rho_2)}{2[1-(\rho_1+\rho_2)]}\tau, \quad \sigma_S^2 = \frac{(\rho_1+\rho_2)[4-(\rho_1+\rho_2)]}{12[1-(\rho_1+\rho_2)]^2}\tau^2. \qquad (П6.105)$$

В этих выражениях $\rho_1 = \lambda_1\tau$ и $\rho_2 = \lambda_2\tau$. Коэффициент вариации времени задержки заявок рассчитывается из соотношений (П6.105):

$$\nu_S = \frac{\sqrt{(\rho_1+\rho_2)[4-(\rho_1+\rho_2)]}}{[2-(\rho_1+\rho_2)]\sqrt{3}}. \qquad (П6.106)$$

Для СМО второго вида необходимо рассчитывать те же характеристики, но для разных приоритетов. Следует отметить, что для заявок второго приоритета расчет дисперсии обычно не представляет особого интереса. Причина данного утверждения заключается в том, что для заявок этого вида показатель $IPDV$ не нормируется.

В [2] приведены выражения, позволяющие рассчитать математическое ожидание длительности задержки заявок первого и второго приоритета – $S_1^{(1)}$ и $S_2^{(1)}$. С учетом исследуемой модели искомые формулы можно представить в следующем виде:

$$S_1^{(1)} = \frac{2-\rho_1+\rho_2}{2(1-\rho_1)}\tau, \quad S_2^{(1)} = \frac{(\rho_1+\rho_2)+2(1-\rho_1)(1-\rho_1-\rho_2)}{2(1-\rho_1)(1-\rho_1-\rho_2)}\tau. \qquad (П6.107)$$

Для большей наглядности оценок, которые касаются эффективности приоритетного обслуживания, целесообразно рассмотреть частный случай такого рода: $\rho_1 = \rho_2$, а $\tau = 1$. Сумму $\rho_1 + \rho_2$ целесообразно обозначить через ρ. Эта величина определяет суммарную нагрузку СМО.

Дисперсия времени задержки заявок первого относительного приоритета – σ_{S1}^2 и коэффициент вариации – ν_{S1} определяются на основе соотношений, приведенных в [2]:

$$\sigma_{S1}^2 = \frac{(\rho_1+\rho_2)(4-\rho_1-3\rho_2)}{12(1-\rho_1)^2}\tau^2, \quad \nu_{S1} = \frac{\sqrt{(4-\rho_1-3\rho_2)(\rho_1+\rho_2)}}{(2-\rho_1+\rho_2)\sqrt{3}}. \qquad (П8.108)$$

На рисунке П6.10 показана зависимость $S^{(1)}$, $S_1^{(1)}$ и $S_2^{(1)}$ от нагрузки для обоих видов СМО. Очевидно, что $S_2^{(1)} > S^{(1)} > S_1^{(1)}$. Введение приоритетного обслуживания становится весьма эффективным при росте суммарной нагрузки системы. Для первого приоритета удается сохранить медленный рост среднего значения длительности задержки заявок. Преимущества такого рода обеспечиваются за счет чрезмерного роста среднего значения времени задержки для заявок второго приоритета. Очевидно, что подобный подход приемлем в тех случаях, когда задержка заявок низшего приоритета не столь существенна.

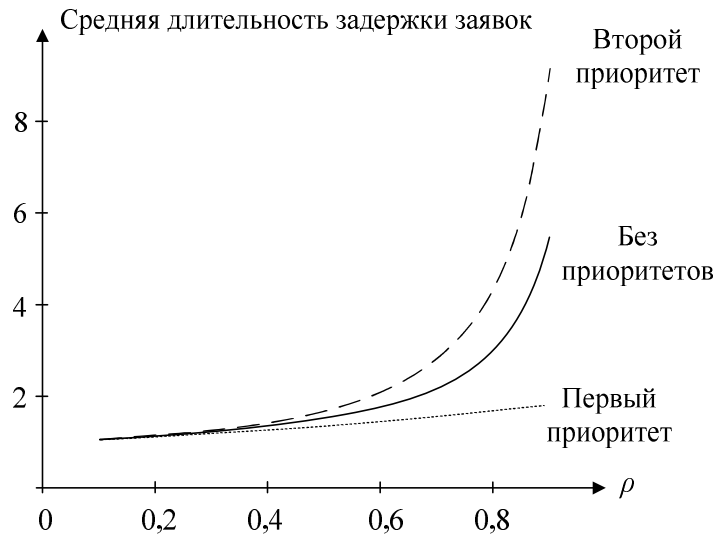


Рисунок П6.10. Среднее значение задержки заявок для двух дисциплин обслуживания

Для тех же допущений, которые были использованы при построении графиков ($\rho_1 = \rho_2$, $\tau = 1$), можно оценить влияние приоритетного обслуживания на дисперсию времени задержки заявок (IP-пакетов). На рисунке П6.11 показаны две кривые. Верхняя кривая иллюстрирует изменение дисперсии времени задержки заявок в СМО при их обслуживании без приоритетов. Нижняя кривая соответствует поведению дисперсии длительности задержки для заявок первого относительного приоритета. Данный рисунок наглядно доказывает возможность снижения дисперсии длительности задержки заявок за счет введения приоритетного обслуживания.

Рисунок П6.11. Дисперсия задержки заявок для двух дисциплин обслуживания

На рисунке П6.12 представлены аналогичные графики для коэффициентов вариации длительности задержки заявок. Их поведение также свидетельствует об эффективности приоритетного обслуживания. Правда, различие в значениях коэффициентов вариации не столь существенно, как для дисперсий. Это объясняет график, приведенный на рисунке П6.10. Среднее значение времени задержки первого приоритета меньше, чем аналогичная величина для того алгоритма, при котором обслуживание требований осуществляется по правилу FIFO: "первым пришел – первым обслужен".

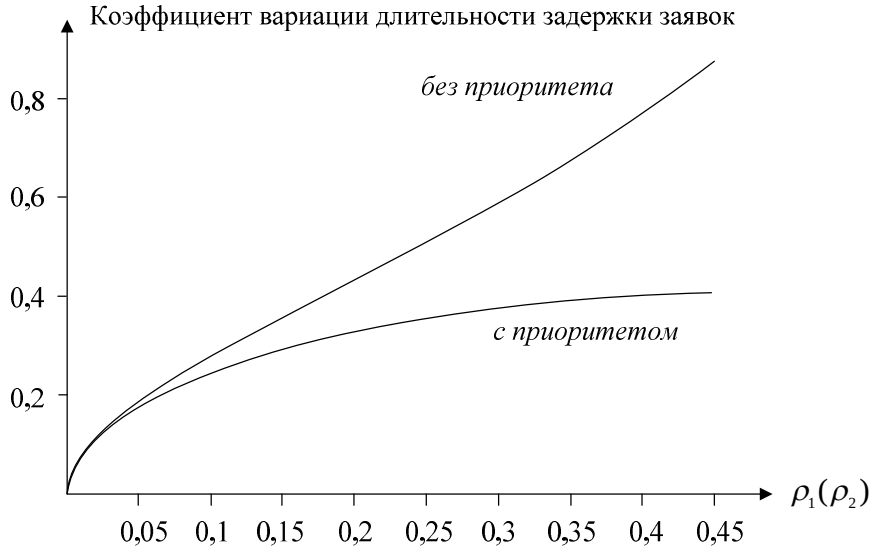


Рисунок П6.12. Коэффициент вариации задержки заявок для двух дисциплин обслуживания

Полученные оценки эффективности для дисциплины приоритетного обслуживания заявок (IP-пакетов) позволяют сформулировать следующие выводы:

- транспортные ресурсы, рассчитанные без учета возможности приоритетного обслуживания, представляют собой верхнюю границу величины пропускной способности, которая необходима для соблюдения заданных показателей качества обслуживания трафика в ССП;
- эффективность приоритетного обслуживания ощутима только при высокой нагрузке СМО, что позволяет упростить ряд вычислений в области $\rho \le 0,5$.

Литература к Приложению 6

1. Л. Клейнрок. Теория массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1979.
2. Л. Клейнрок. Вычислительные системы с очередями. – М.: Мир, 1979.
3. Ю.Н. Корнышев, А.П. Пшеничников, А.Д. Харкевич. Теория телетрафика. – М.: Радио и Связь, 1996.
4. Т. Корн, Г. Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984.
5. А.И. Васильченко. Исследование задержек сообщений в общем канале сигнализации и определение их влияния на качество обслуживания абонентов ГТС. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: ЦНИИС, 1974.
6. Д. Риордан. Вероятностные системы обслуживания. – М.: Связь, 1966.
7. Н.А. Соколов. Время ожидания сигнальных единиц второго относительного приоритета в общем канале сигнализации. Сборник научных трудов ЦНИИС "Квазиэлектронная и электронная коммутационная техника". – М.: ЦНИИС, 1980.
8. В.А. Диткин, А.П. Прудников. Интегральные преобразования и операционное исчисление. – М.: Наука, 1974.
9. Г. Деч. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. – М.: Наука, 1971.
10. С.В. Володин, К.К. Колин. Об аппроксимации распределения длительности ожидания заявок в одноканальных системах массового обслуживания. В книге "Системы распределения информации". – М.: Наука, 1972.

11. Н.А. Соколов. Распределение длительности задержки заявок в однолинейных системах массового обслуживания. В книге "Модели распределения информации и методы их анализа". – М.: Наука, 1988.
12. Д. Штойян. Качественные свойства и оценки стохастических моделей. – М.: Мир, 1979.
13. Н.А. Соколов. Однолинейная система массового обслуживания с равномерно распределенной длительностью обслуживания заявок. В книге "Модели систем информатики". – М.: Наука, 1987.
14. И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: Наука, 1971.
15. А.Н. Соколов. Метод оценки задержки IP пакетов в узле коммутации. – Научно-технические ведомости СПбГПУ, №4(82), 2009.
16. ITU-T. Network Performance Objectives for IP-Based Services. Recommendation Y.1541. – Geneva, 2006.
17. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям. – СПб.: Наука, 2001.
18. А.Н. Соколов. Приближенный метод анализа однолинейных систем массового обслуживания с постоянным временем обработки заявок. – Проблемы информатики, 2010, №3.
19. О.И. Шелухин, А.М. Тенякшев, А.В. Осин. Моделирование информационных систем. – М.: Радиотехника, 2005.
20. М.Н. Петров, Д.Ю. Пономарев, Г.Г. Яновский. Вероятностно-временные характеристики асинхронных сетей интегрального обслуживания. – Красноярск, НИИ СУВПТ, 2004.
21. Ю.В. Семенов, Н.А. Соколов. Инженерный метод оценки пропускной способности однолинейных систем. – Сборник научных трудов учебных институтов связи. Л.: ЛЭИС, 1987.
22. Н.А. Соколов, И.М. Ехриель. Анализ однолинейной системы с ожиданием типа HD/HD/1. В книге "Модели и методы информационных сетей". – М.: Наука, 1990.
23. Н.А. Соколов, И.М. Ехриель. Функция распределения длительности ожидания в системе HD/HD/1. В книге "Анализ систем информатики". – М.: Наука, 1991.
24. А.Н. Соколов. Оценка параметров задержки пакетов высшего приоритета в IP-сетях. – Электросвязь, 2011, №5.
25. А.Н. Соколов. Метод оценки производительности узлов коммутации для сетей связи следующего поколения. – Проблемы информатики, 2010, №2.
26. Г.П. Башарин, В.А. Наумов, К.Е. Самуйлов. К анализу задержек в общем канале сигнализации. – Сборник научных трудов ЦНИИС "Квазиэлектронные и электронные системы коммутации", 1983.
27. Е.С. Вентцель. Теория вероятностей. – М.: издательский центр "Академия", 2005.

Подобно тому, как все искусства тяготеют
к музыке, все науки стремятся к математике.
(Д. Сантаяна)

Приложение 7. Методы планирования IP сетей

Чем дальше эксперимент от теории,
тем ближе он к Нобелевской премии.
(Ф. Жолио-Кюри)

П7.1. Анализ сетей массового обслуживания

Некоторые задачи, касающиеся задержек IP-пакетов, связаны с анализом моделей СеМО. Типичным примером задач такого рода служит оценка характеристик качества обслуживания между двумя ИПС. Обычно между ними располагаются несколько узлов коммутации, каждый из которых может быть представлен в виде СМО.

Практический интерес связан с характеристиками качества обслуживания между парой ИПС, для которых известна совокупность используемых СМО. Эта совокупность задается правилами построения сетей электросвязи. Например, для оценки характеристик качества обслуживания вызовов в ТФОП количество используемых СМО вычисляется на основе заранее специфицированных принципов установления местных, междугородных и международных соединений. В частности, максимальное количество узлов коммутации, которые используются для каждого вида соединения, определено в рекомендации МСЭ Е.721.

На рисунке П7.1 приведена гипотетическая модель СеМО. Она, например, подходит для иллюстрации принципов установления междугородного соединения в ТФОП. В этом случае СМО1 и СМО5 соответствуют узлам коммутации, в которые включены терминалы абонентов, участвующих в организации связи. СМО2, СМО3 и СМО4 – модели тех транзитных узлов, через которые может быть установлено требуемое соединение.

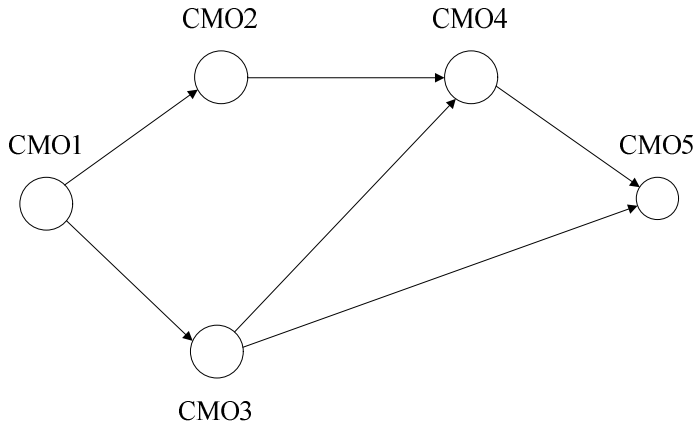


Рисунок П7.1. Модель сети массового обслуживания

На вход $i-ой$ СМО (для рассматриваемой модели $i=\overline{1,5}$) поступает поток заявок с интенсивностью λ_i. Для многих практических приложений интересны так называемые линейные СеМО. Условие линейности состоит в том, что все пары величин λ_k и λ_l из одного множества связаны между собой посредством коэффициента p_{kl}:

$$\lambda_k = p_{kl}\lambda_l. \qquad (П7.1)$$

Заметим, что в общем случае $p_{kl} \neq p_{lk}$. Коэффициенты p_{kl} образуют матрицу. Для модели, изображенной на рисунке П7.1, часть коэффициентов p_{kl} равна нулю:

$$\begin{Vmatrix} 0 & p_{12} & p_{13} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{24} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{34} & p_{35} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix}. \qquad (П7.2)$$

Нелинейный характер связи величин λ_k и λ_l может быть обусловлен различными причинами. Например, некоторые заявки, попадающие в $i-й$ узел, порождают сложные процессы, нарушающие соотношение (П7.1).

Принято также различать три вида СеМО: открытые (разомкнутые), замкнутые и комбинированные. В этом разделе рассматриваются только открытые СеМО, для которых суммарное количество заявок (обслуживаемых и находящихся в очереди) нельзя считать постоянной величиной. Это свойство обусловлено возможностью поступления в каждую СМО заявок от внешних источников нагрузки. Далее рассматриваются однородные СеМО, обслуживающие заявки одного типа. Кроме того, предполагается, что заявкам не назначается приоритет, а используемая дисциплина обслуживания относится к классу FIFO (*первым пришел – первым обслужен*).

СеМО состоит из N элементов. Каждый элемент – отдельная СМО. Предполагается, что длительность перехода заявки из одной СМО в другую равна нулю. Если гипотеза такого рода не может быть принята, то исследуемую модель приходится усложнять. Типичный пример – необходимость учета времени распространения сигнала между двумя узлами коммутации. Это время обычно постоянно. Его можно учесть за счет введения дополнительной СМО вида $G/D/\infty$. Эта модель предполагает, что для каждой заявки может быть сразу же выделено обслуживающее устройство. Следовательно, длительность задержки заявки в СМО – $S^{(1)}$ равна времени ее обслуживания – $B^{(1)}$, а оно для модели $G/D/\infty$ неизменно.

Ряд полезных моделей СеМО рассматривается, например, в [1 – 7]. Можно найти и другие монографии, посвященные соответствующему разделу теории телетрафика.

Решение практических задач, использующих модели СеМО, зачастую связано с нахождением трех показателей: вероятности отказа в обслуживании, среднего значения длительности задержки заявок и квантиля одноименной ФР. Это утверждение основано на правилах нормирования качественных показателей, принятых МСЭ и ETSI. Вернемся к модели, показанной на рисунке П7.1. Пусть показатели качества обслуживания трафика нормированы для ИПС, расположенных перед СМО под номерами "1" и "5". Это значит, что все нормы должны выполняться при использовании любого из возможных путей прохождения заявок из СМО1 в СМО5. Будем считать, что максимальные величины вероятности отказа в обслуживании и задержки заявок наблюдаются для маршрута СМО1 – СМО2 – СМО4 – СМО5. Для этого маршрута, содержащего m СМО ($m=4$), должны выполняться три показателя качества обслуживания трафика:

- вероятность потери заявок – $P(m)$;
- среднее значение длительности задержки заявок – $S^{(1)}(m)$;
- квантиль ФР длительности задержки заявок – $t_p(m)$.

Если процессы потери заявок на всех фазах обслуживания взаимно независимы, то величина $P(m)$ вычисляется по известным вероятностям потери заявок во всех СМО – π_k:

$$P(m) = 1 - \prod_{k=1}^{m} (1 - \pi_k). \qquad (П7.3)$$

Еще проще, в силу аддитивности математического ожидания, оценивается среднее значение длительности задержки заявок. Для этого надо знать аналогичные величины для каждой $k-й$ СМО – $S_k^{(1)}$:

$$S^{(1)}(m)=\sum_{k=1}^{m}S_k^{(1)}. \qquad (П7.4)$$

К сожалению, вычисление квантиля $t_p(m)$ осуществляется более сложным образом. Сначала следует найти ФР длительности задержки заявок для маршрута, состоящего из m СМО – $S(m,t)$. Пусть известны аналогичная ФР для каждой $k-й$ СМО – $S_k(t)$ и ее преобразование Лапласа-Стилтьеса – $\xi_k(s)$. В этом случае, при условии независимости задержек на каждой фазе обслуживания, справедливо следующее соотношение:

$$\xi(m,s)=\prod_{k=1}^{m}\xi_k(s). \qquad (П7.5)$$

Распределение $S(m,t)$ определяется из своего изображения – $\xi(m,s)$. Квантиль $t_p(m)$ находится численно в результате решения такого уравнения:

$$S\left(m,t_p(m)\right)=p. \qquad (П7.6)$$

Вычисления по формулам (П7.3) и (П7.4) не представляются сложными задачами. Иная ситуация складывается с оценкой квантиля, а точнее – с получением распределений вида $S(m,t)$. Ниже приводятся два примера, которые иллюстрируют способы получения искомой функции.

Первый пример связан с так называемой экспоненциальной СеМО, в которой каждая фаза обслуживания может быть представлена моделью $M/M/1$. Будем считать, что известны величины интенсивности входящего потока заявок – λ_k и их обслуживания – μ_k в каждой СМО. Это позволяет записать преобразование Лапласа-Стилтьеса $\xi(m,s)$ в такой редакции:

$$\xi(m,s)=\prod_{k=1}^{m}\frac{\mu_k-\lambda_k}{s+(\mu_k-\lambda_k)}. \qquad (П7.7)$$

Далее целесообразно рассматривать частный случай, когда параметры λ_k и μ_k для всех СМО одинаковы. Это позволяет опустить индекс "k" и трансформировать формулу (П7.7):

$$\xi(m,s)=\left[\frac{\mu-\lambda}{s+(\mu-\lambda)}\right]^m. \qquad (П7.8)$$

Используя таблицы преобразования Лапласа [8], несложно получить распределение $S(m,t)$:

$$S(m,t)=1-e^{-(\mu-\lambda)t}\sum_{k=0}^{m-1}\frac{\left[(\mu-\lambda)t\right]^{m-k-1}}{(m-k-1)!}. \qquad (П7.9)$$

Если величины λ и μ на всех фазах будут различны, то формула для вычисления функции $S(m,t)$ становится более громоздкой, но ее вывод не вызывает затруднений. В ряде случаев выражение (П7.9) целесообразно представлять в другой форме, используя отношение λ к μ, то есть величину ρ:

$$S(m,t)=1-e^{-(1-\rho)\mu t}\sum_{k=0}^{m-1}\frac{\left[(1-\rho)\mu t\right]^{m-k-1}}{(m-k-1)!}. \qquad (П7.10)$$

Характер функции $S(m,t)$ зависит и от нагрузки СМО, и от количества систем в маршруте. На рисунке П7.2 показано изменение плотности исследуемого распределения – производной от функции $S(m,t)$. Поведение плотности ФР нагляднее иллюстрирует различие между возможными задержками при разном количестве фаз обслуживания. При вычислении производных были приняты два условия: $\rho = 0,5$ и $\mu = 1$.

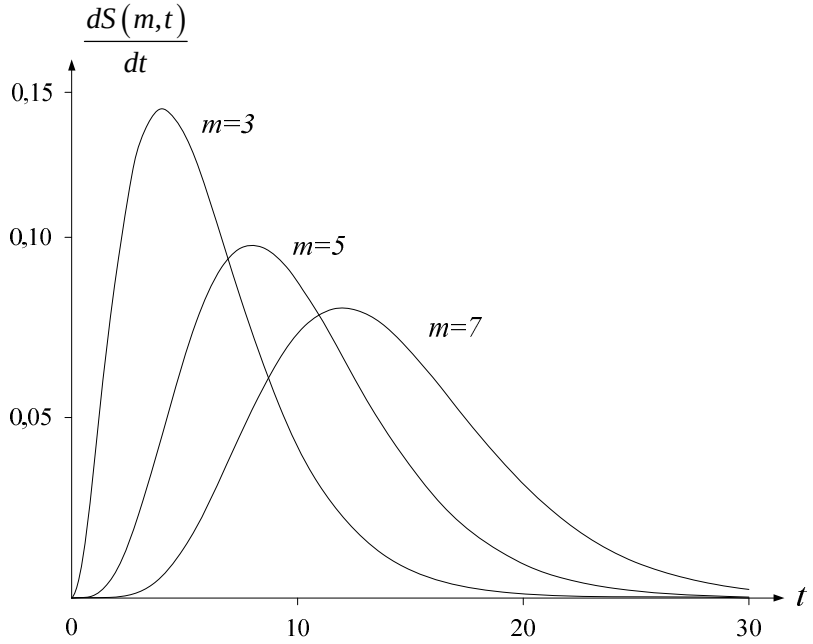


Рисунок П7.2. Производные функции $S(m,t)$ для экспоненциальной СеМО

Характер кривых, изображенных на рисунке П7.2, показывает, что при росте числа фаз обслуживания огибающая плотности распределения меняет свой характер. Она все более становится похожа на плотность нормального закона распределения случайной величины. По всей видимости, эта закономерность послужила основанием для разработки метода оценки квантиля, который рассматривался в шестом Приложении.

При получении распределений $S_k(t)$ в процессе измерений приходится оперировать случайной величиной, распределенной на конечном интервале времени. Рассмотрим случай равномерного распределения на отрезке (t_{MIN}, t_{MAX}). Можно считать, что $t_{MIN} = 0$. Для других значений t_{MIN} исследуемое распределение можно сдвинуть по оси "Время" так, чтобы выполнялось условие: $t_{MIN} = 0$. В этом случае вместо значения t_{MAX} следует использовать разность $t_{MAX} - t_{MIN}$.

Предположим, что заявки проходят через m фаз с равными значениями величины t_{MAX}, обозначаемой далее через x. Очевидно, что тогда индекс "k" далее можно опустить. Необходимо найти распределение исследуемой случайной величины. Для каждой СМО распределение длительности задержки заявок определяется преобразованием Лапласа-Стилтьеса такого вида [8]:

$$\xi(s) = \frac{1 - e^{-xs}}{xs}. \qquad (П7.11)$$

Для нахождения ФР суммы случайных величин следует воспользоваться правилом свертки изображений [8]:

$$\xi(m,s) = \frac{\sum_{i=0}^{m} (-1)^i C_m^i e^{-isx}}{(xs)^m}. \qquad (П7.12)$$

Следует подчеркнуть, что применение данного правила для рассматриваемой модели связано с допущением о взаимной независимости процессов, происходящих во всех компонентах исследуемой СеМО. Для экспоненциальной СеМО существует строгое доказательство правомерности использования правила свертки [9].

Оригинал от правой части выражения (П7.12) на основании теоремы смещения [8] представим в такой форме:

$$S(m,t)=\frac{1}{m!x^m}\begin{cases} t^m, \quad при\ 0\le t<x \\ t^m-C_m^1(t-x)^m, \quad при\ x\le t<2x \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \sum_{i=0}^{m-1}(-1)^i C_m^i(t-ix)^m, \quad при\ (m-1)x\le t<mx \\ m!x^m, \quad t\ge mx \end{cases}. \qquad (П7.13)$$

Если величины t_{MAX} для всех фаз не идентичны, то оригинал функции $\xi(m,s)$ будет более громоздким. Характер кривых $S(m,t)$ при этом не меняется. Графики плотности распределения приведены на рисунке П7.3 для нескольких значений m – количества тех СМО, через которые проходят заявки. Величина x принята равной единице.

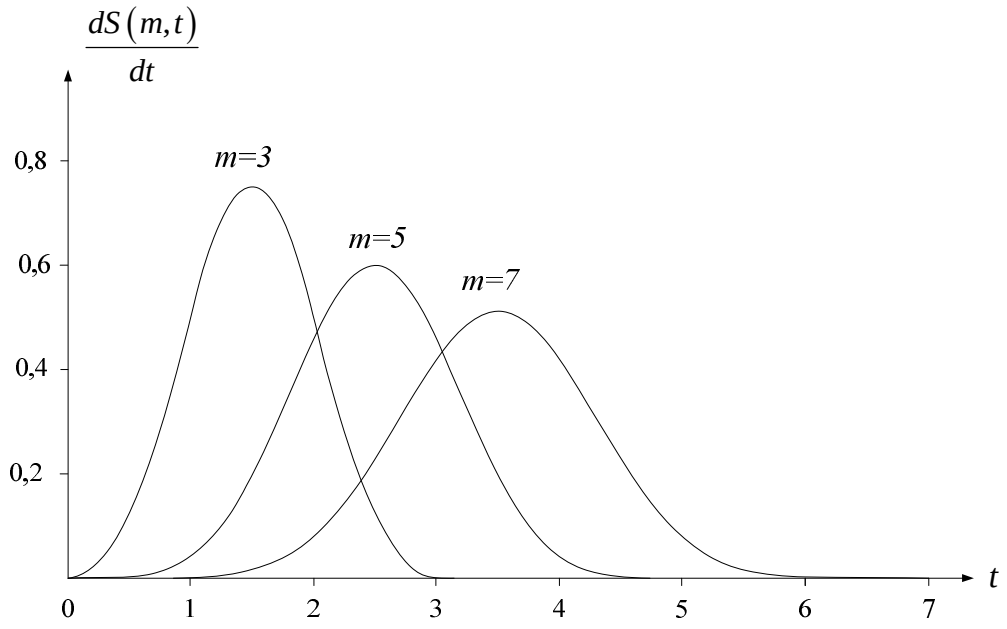


Рисунок П7.3. Производные функций $S(m,t)$ для сети, состоящей из СМО вида $M/U/1$

Графики плотности трех распределений менее похожи на аналогичные кривые для нормального закона. Это обусловлено тем, что функция $S(m,t)$ определена на конечном интервале времени. При использовании таких функций могут возникать большие ошибки в оценке квантиля. Это утверждение иллюстрируют данные из таблицы П6.5, хотя в ней содержатся результаты расчета только для параболического распределения.

В этом разделе кратко перечислены те направления исследования СеМО, которые, по всей видимости, будут полезны для решения задач, относящихся к характеристикам качества обслуживания мультисервисного трафика в сетях следующего поколения. Для задач подобного рода целесообразно выделить пять направлений исследований СеМО.

Во-первых, практический интерес представляет изучение СеМО, начавшееся с работ Дж. Джексона [2]. Исследованные им модели часто называют сетями Джексона. Другое название – открытые сети. Этими словами подчеркивается тот факт, что в СеМО могут поступать заявки от внешних источников трафика. Проще всего исследовать модели, ко-

торые называются экспоненциальными. В настоящее время практический интерес смещается к моделям СеМО, для которых функции $A(t)$ и $B(t)$ заметно отличаются от экспоненты.

Во-вторых, для некоторых компонентов инфокоммуникационных систем интересны модели СеМО, в которых циркулирует постоянное количество заявок. Подобные сети, как правило, называют замкнутыми. Иногда их именуют сетями Гордона-Ньюелла [2] – по фамилиям авторов, опубликовавших одну из первых работ по исследованию замкнутых СеМО. Первоначально анализировались характеристики экспоненциальных замкнутых сетей. Естественно, что процессы работы современных инфокоммуникационных систем стимулируют изучение замкнутых СеМО более общего вида.

В-третьих, некоторые процессы, протекающие в инфокоммуникационных системах, могут быть исследованы при помощи моделей, называемых СеМО с отрицательными заявками [5]. В ряде публикаций соответствующие модели называют G-сетями. Это связано с фамилией известного специалиста в области теории телетрафика – *Gelenbe*. Он одним из первых начал изучение СеМО с отрицательными заявками. Появление в СеМО отрицательной заявки меняет работу сети специфическим образом. Из сети "уходит" одна обычная заявка (ее называют положительной). После этого события отрицательная заявка покидает СеМО без обслуживания.

В-четвертых, следует отметить сравнительно новое направление в исследовании СеМО, известное по аббревиатуре $BCMP$. Это сокращение образовано из первых букв фамилий авторов предложенного метода анализа СеМО: Baskett, Chandy, Muntz, Palacios. Метод $BCMP$ позволяет получить уравнения равновесия (глобального баланса) для сетей, обслуживающих заявки разных классов (приоритетов). При этом сеть включает в себя узлы нескольких типов, которые различаются количеством обслуживающих приборов и дисциплиной обслуживания заявок. Метод $BCMP$ позволяет исследовать модели, более сложные, чем сети Джексона.

В-пятых, нельзя не упомянуть об имитационном моделировании – важном методе исследования СеМО. Многие модели, важные с практической точки зрения, невозможно анализировать при помощи только аналитических методов. Кроме того, моделирование следует рассматривать как один из эффективных инструментов проверки результатов, которые получены аналитически за счет введения каких-либо допущений.

Неприятная особенность прогресса
состоит в том, что, скрывая будущее,
он отравляет радость настоящего.
(В. Швебель)

П7.2. Процессы обмена IP-пакетами

Процессам обмена пакетами в IP сети присущи некоторые особенности, которые определяют структуру соответствующей модели СеМО. Эти особенности связаны с алгоритмами функционирования терминалов, генерирующих IP-пакеты. Особый интерес связан с терминалами, которые предназначены для телефонной связи.

Пакетизация речевого сигнала всегда приводит к дополнительной задержке, которая может существенно ухудшить качество телефонной связи. Эксплуатируемая ныне ТФОП основана на технологии "коммутация каналов". За исключением соединений, которые устанавливаются через каналы спутниковой связи, время передачи сигналов между двумя терминалами, как правило, ниже нормируемой величины [10]. Это означает, что при разумном использовании резерва времени, который *"съедают"* пакетные технологии, качество телефонной связи не снижается. В системах IP телефонии [11, 12] задачи по обеспечению качества передачи речи очень актуальны.

Речевой сигнал в сети ССП претерпевает существенную задержку в терминальном оборудовании. Этот вид задержки показан в левой и в правой частях рисунка П7.4. При формировании IP-пакета задержка, в значительной мере, обусловлена процедурами коди-

рования. На стороне приемного устройства основная причина задержки речевых пакетов – наличие буфера синхронизации (*jitter buffer*). Он чаще именуется буфером джиттера. Его основная функция – минимизация дисперсии интервалов между моментами поступления IP-пакетов.

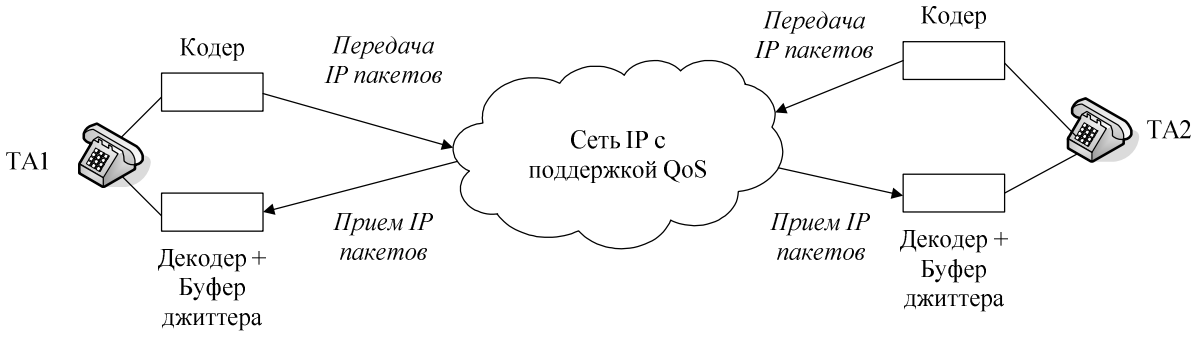


Рисунок П7.4. Процесс прохождения IP-пакетов в сети ССП

Концепция ССП базируется на представлении информации любой природы в виде последовательности IP-пакетов, передаваемых между ИПС. При обмене IP-пакетами через сеть могут происходить события, ухудшающие характеристики качества обслуживания трафика. Типичные примеры таких событий – чрезмерные задержки IP-пакетов, их потери и искажения. На основе результатов, полученных при исследовании трафика данных и видео, МСЭ предложил показатели качества обслуживания для ССП. В частности, в рекомендации Y.1541 [13] приведен ряд норм. Их краткий анализ содержится в третьей главе монографии. Ниже рассматривается часть нормированных показателей, которая важна с точки зрения планирования сети.

Задержку речевого сигнала в кодирующем устройстве можно считать постоянной величиной. Это предположение справедливо и для пары "декодер – буфер джиттера". Если ТА1 генерирует поток IP-пакетов с произвольным законом распределения $A(t)$, то пара "терминал – первая система в СеМО" может быть представлена такой моделью:

$$G/D/\infty \to \bullet/D/1. \qquad (П7.14)$$

Эта модель описывает процесс выдачи IP-пакетов постоянной длины из терминала в сеть. Символ "$\bullet$" указывает на то факт, что характер входящего потока – функция $A(t)$ – полностью определяется процессами обслуживания на предыдущей фазе. Для связки вида (П7.14) символ "$\bullet$" можно заменить буквой "G". На стороне приема IP-пакетов может использоваться похожая модель:

$$G/D/1 \to \bullet/D/\infty. \qquad (П7.15)$$

Использование СМО с бесконечным числом обслуживающих приборов позволяет учесть постоянные задержки IP-пакетов без изменения характера поступающего потока заявок. Все постоянные задержки в терминальном оборудовании можно "перенести" в одну СМО. Подобный подход не искажает результаты расчета характеристик качества обслуживания, позволяя упростить исследуемую модель. Для декомпозиции показателей качества обслуживания IP-пакетов целесообразно пересчитать нормы, содержащиеся в рекомендации МСЭ Y.1541 или в аналогичных документах, с учетом постоянных задержек в терминальном оборудовании. Иными словами второй столбец в таблице П7.1 целесообразно представить в виде разности нормированной величины $IPTD$ и некой постоянной средней задержки T_j, вычисленной для каждого класса QoS. Таблица П7.1 не содержит показатель $IPER$, так как он не существенен для дальнейших исследований. Каждый искаженный IP-пакет теряется, что учитывается в соответствующих формулах.

Таблица П7.1 Модифицированные показатели QoS для ССП

Класс QoS	$IPTD - T_j$, мс	$IPDV$, мс	$IPLR$
0	$100 - T_0$	50	10^{-3}
1	$400 - T_1$	50	10^{-3}
2	$100 - T_2$	*Не нормируется*	10^{-3}
3	$400 - T_3$		10^{-3}
4	$1000 - T_4$		10^{-3}
5	*Не нормируется*		
6	$100 - T_6$	50	10^{-5}
7	$400 - T_7$	50	10^{-5}

Величина T_j не может быть одинаковой для всех классов QoS. Данное утверждение справедливо даже при передаче и обработке всех IP-пакетов по правилу FIFO [4]: первым пришел – первым обслужен. Для каждого вида информации или же при использовании неодинаковых атрибутов схожих услуг могут применяться разные алгоритмы с целью формирования IP-пакетов. Это приводит к различию величин T_j. Правда, во множестве $\{J\}$ наверняка найдутся совпадающие элементы для разных классов QoS. В технической литературе легко найти несколько оценок для значений T_j. Можно констатировать, что исследуемая величина измеряется десятками миллисекунд [13, 14].

Показатели *IPTD* и *IPDV* определены для IP сети, которая, в принципе, может иметь протяженность вплоть до 27500 км [15]. При таком расстоянии распространение сигнала со скоростью света осуществляется за 90 мс. Для коаксиальных проводников и оптических волокон время распространения сигнала составляет от 4 до 5 микросекунд на километр. Это означает, что расстояние в 27500 км сигнал преодолеет за 110 – 137,5 мс. Очевидно, что тогда для нулевого и второго классов QoS установленные нормы не могут обеспечиваться ни при каких значениях T_j.

По всей видимости, нормы на показатели QoS, приведенные в рекомендации МСЭ Y.1541, будут пересматриваться. В этом случае будут учтены имеющиеся несоответствия. Тем не менее, пример, приведенный в предыдущем абзаце, свидетельствует о важности снижения дополнительных задержек, которые порождаются пакетными технологиями передачи и коммутации.

В третьем дополнении к рекомендации МСЭ Y.1541 приведена модель разговорного тракта для связи двух терминалов. Эта структура воспроизведена на рисунке П7.5. Он основан на семиуровневой модели ISO [16]. Предполагается, что в рассматриваемом фрагменте IP сети используются протоколы UDP (передача дейтаграмм пользователя) и RTP (транспортировка пакетов в режиме реального времени). На стороне говорящего абонента задержка IP-пакета (до момента его выдачи в сеть) может составлять 20 мс. На стороне слушающего абонента для снижения джиттера задержки устанавливается буфер синхронизации. В этом буфере пакет может храниться 60 мс. Следовательно, даже без учета очередей в узлах коммутации ССП и времени распространения сигналов суммарная задержка при телефонном разговоре может составить 80 мс.

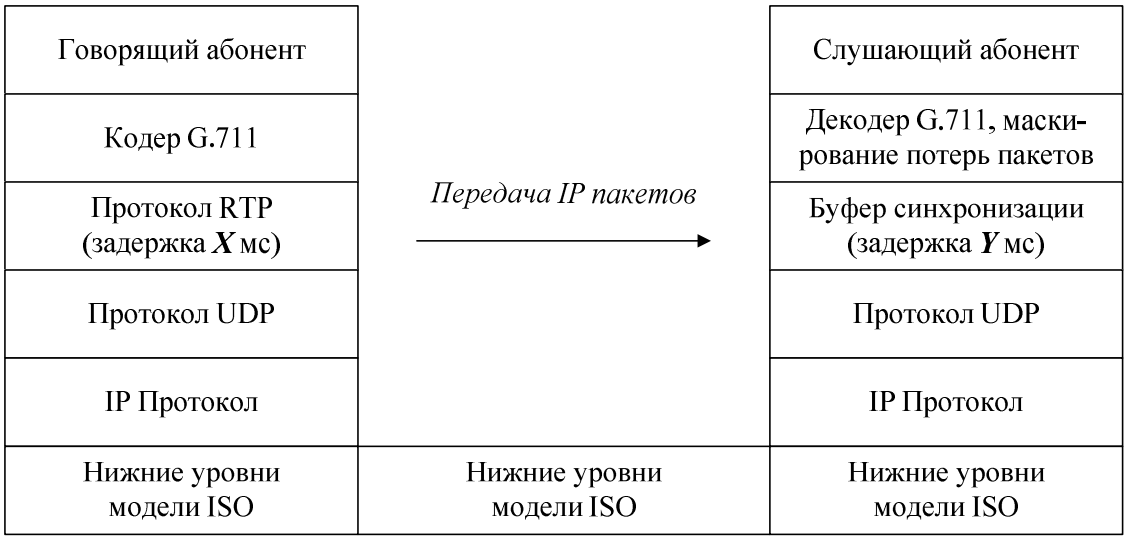


Рисунок П7.5. Модель разговорного тракта в IP сети

В литературе приводятся и другие значения постоянной задержки IP-пакетов на обоих концах сети. Очевидно, что задержку в 80 мс следует считать максимальной. Это утверждение объясняется несколькими аргументами. Во-первых, ожидаемые требования к качеству передачи речи будут соответствовать уровню, к которому привыкли абоненты, пользуясь услугами ТФОП. В ряде случаев абоненты будут готовы заплатить за более высокое качество речи, которое ETSI отнес к широкополосному классу [17]. Тогда следует уменьшать величину $IPTD$. Во-вторых, устойчивое снижение стоимости транспортных ресурсов [18] позволяет создавать тракты обмена IP-пакетами, пропускная способность которых достаточна для минимизации задержек процессов обмена информацией.

Высокая пропускная способность трактов обмена IP-пакетами должна сочетаться с адекватной производительностью узлов коммутации. В [13, 17] содержатся указания, подтверждающие этот факт. В частности, среди ресурсов, которые следует использовать для обмена IP-пакетами, предпочтение отдается трактам STM. Минимальная пропускная способность трактов данного вида составляет 155 Мбит/с.

Качество телефонной связи, воспринимаемое абонентами, определяется факторами разного рода. Их взаимосвязь иллюстрирует рисунок П7.6 [19].

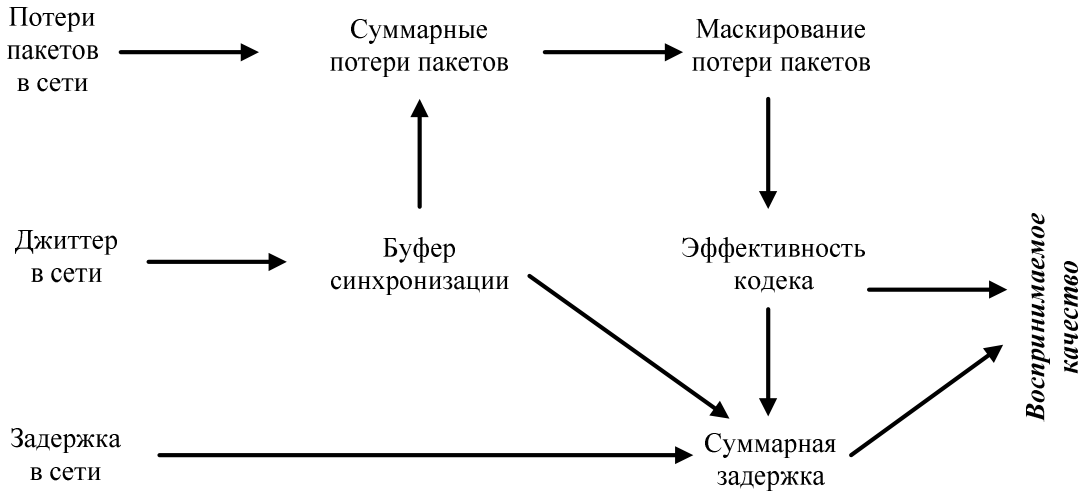


Рисунок П7.6. Факторы, определяющие воспринимаемое абонентом качество связи

При декомпозиции любого из нормируемых показателей качества обслуживания необходимо учитывать влияние основных характеристик всех используемых технических средств. Методика учета совокупности факторов, влияющих на качество телефонного разговора, приведена в рекомендации МСЭ G.107 [20]. В ней специфицирована так называе-

мая *E-model*, которая позволяет оценить качество телефонной связи на этапе планирования сети.

Вернемся к модели, которая показана на рисунке П7.5. Допустим, что в качестве максимального значения T_0 выбрана величина, равная 80 мс. Это значение будет далее использовано для численных оценок. Разность $\left(IPTD - T_0\right)$, которая составляет 20 мс, надо "распределить" между следующими компонентами сети [13, 14]:

- шлюз доступа (*access gateway*);
- шлюз межсетевого взаимодействия (*internetworking gateway*);
- местная сеть (*distribution*);
- базовая сеть(*core*).

Оценки, приведенные в [17] и в других документах, а также результаты измерений трафика позволяют установить долю вносимой задержки для каждого компонента IP сети. Соответствующие величины далее обозначены как w_i. Сумма всех слагаемых w_i равна единице. В частности, для гипотетического соединения в IP сети можно получить такое распределение:

- шлюз доступа – $w_1 \approx 55,7\%$;
- шлюз межсетевого взаимодействия – $w_2 \approx 16,6\%$;
- местная (городская или сельская) сеть – $w_3 \approx 16,6\%$;
- базовая сеть (междугородная и международная) – $w_4 \approx 11,1\%$.

Такой характер распределения объясняется следующими факторами. Во-первых, в базовой сети применяются высокопроизводительные маршрутизаторы и транспортные ресурсы с высокой пропускной способностью. Поэтому доля задержки, вносимой базовой сетью, даже при использовании сравнительно большого числа узлов коммутации (их функции выполняют маршрутизаторы) оценивается на уровне 11,1%. Во-вторых, высокая доля допустимой задержки в сети доступа объясняется большим объемом логических процедур, которые выполняются в соответствующем шлюзе. Следует также учесть, что величины, которые предложены для коэффициентов w_i, целесообразно рассматривать как предварительные оценки. Они будут уточняться по мере накопления опыта построения сети ССП.

С точки зрения задач планирования сети ССП интересен подход к распределению показателей качества обслуживания мультисервисного трафика, который предложен в рекомендации МСЭ Y.1542 [21]. В этой рекомендации содержатся методологические принципы декомпозиции показателей QoS, установленных между ИПС, на тот случай, когда соединение между терминалами устанавливается через несколько сетей. Задачи такого рода весьма актуальны по ряду причин. Во-первых, междугородные соединения всегда устанавливаются, как минимум, через три сети (считая две местные) даже если используются технические средства, принадлежащие одному Оператору. Во-вторых, при нарушении нормируемых показателей QoS необходимо определить причину – выявить "проблемный" фрагмент инфокоммуникационной системы.

Для распределения показателей качества обслуживания важна как принадлежность технических средств конкретному Оператору, так и функциональные задачи решаемые, каждым компонентом сети. Представляется целесообразным выделить N компонентов между ИПС. Каждый компонент рассматривается как самостоятельная сеть. Первая и $N-ая$ сети обеспечивают подключение ИПС. Кроме того, они взаимодействуют со второй и $(N-1)-ой$ сетями. Все остальные сети не обеспечивают подключение ИПС.

На рисунке П7.7 показана модель, позволяющая детализировать соединение между двумя терминалами, которое устанавливается через N компонентов. Терминалы, как принято в классической телефонии, называются "A" (вызывающий) и "B" (вызываемый). Такие же буквы используются для обозначения ИПС. Для компонента под номером $(N-1)$ указаны границы, между которыми необходимо задать "свои" показатели качества

обслуживания. Эти показатели должны обеспечиваться в процессе обмена информацией между терминалами "A" и "B".

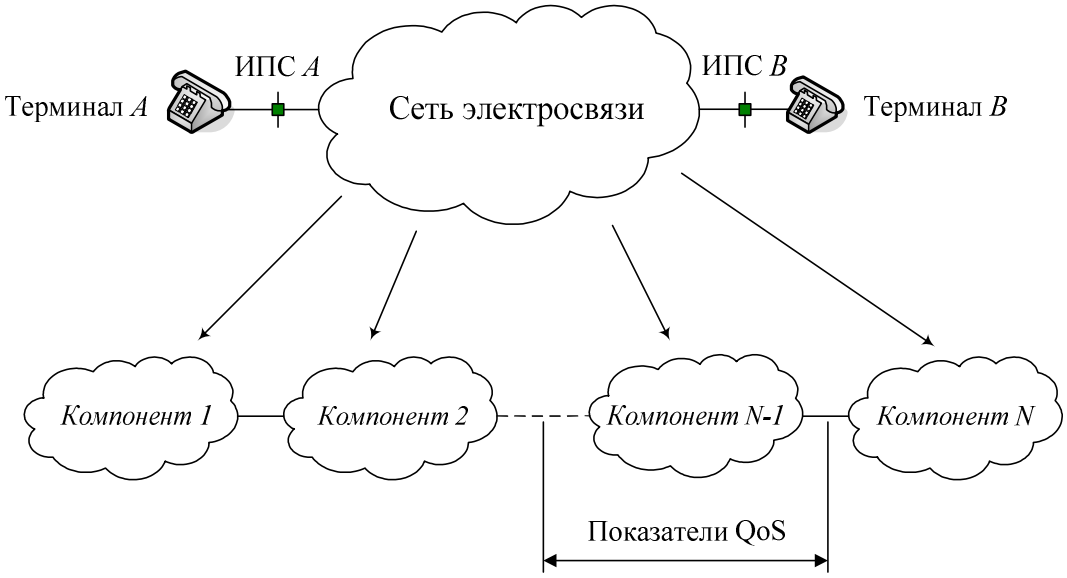


Рисунок П7.7. Модель соединения двух терминалов через несколько сетей

Несколько компонентов, входящих в сферу ответственности одного Оператора, можно объединить в один. Такой подход приемлем при одном условии: объединение в один компонент не должно нарушать принципы управления ресурсами ССП. Для модели, показанной на рисунке П7.7, весовые коэффициенты w_i определяются для каждого $i-го$ $\left(i=\overline{1,N}\right)$ компонента сети.

Повторяющийся хаос становится порядком.
(В. Швебель)

П7.3. Распределение норм на показатели QoS по компонентам сети

Поставленная задача проще всего решается для математического ожидания времени задержки IP-пакетов. Численный пример решения для случая $N=3$ приведен в тексте рекомендации МСЭ Y.1542. В этом разделе рассматривается более общий случай, когда значение N может принимать любые положительные целочисленные значения.

В таблице П7.1 приведены величины, равные значению $IPTD$ минус постоянная задержка T_j. Необходимо также учесть и время распространения сигналов в $i-ом$ компоненте сети – $T_P(i)$. Для базовой сети оно может достигать существенных значений. В некоторых случаях (например, при использовании ресурсов спутниковых систем связи) величина $T_P(i)$ становится ощутимой и в других компонентах сети. В состав величины $T_P(i)$ целесообразно включить время *сериализации* [22].

Термин "сериализация" пришел в отечественную техническую литературу в виде кальки со слова "serialization" в английском языке. Время сериализации – $t_{ser}(i)$ равно отношению размера пакета к скорости его передачи для $i-го$ компонента сети. В составе ССП будут использоваться тракты, для которых скорость передачи измеряется, как минимум, сотнями мегабитов в секунду. Это значит, что величины $t_{ser}(i)$ для реальных длин IP-пакетов оцениваются десятками микросекунд или меньшими значениями. Иными словами, для междугородных и международных соединений $T_P(i) >> t_{ser}(i)$. Для местных соединений временем распространения сигналов можно пренебречь.

Суммарное время распространения сигналов между двумя ИПС обозначается как T_P, а разность $IPTD - T_j$ для $j-го$ класса обслуживания как D_j. Величина T_P одинакова для всех классов обслуживания. По этой причине в ее обозначении не используется индекс " j ". Учитывая изложенные выше соображения, можно записать такую формулу:

$$D_j - T_P = \sum_{\{I\}} w_i \left[D_j - T_P(i) \right]. \qquad (П7.16)$$

Слагаемое вида $w_i \left[D_j - T_P(i) \right]$ представляет собой нормированное значение средней длительности задержки IP-пакетов $j-го$ класса обслуживания в $i-ом$ компоненте сети. Все величины D_j и $T_P(i)$ для сети с заранее выбранной структурой известны. Тогда задача по распределению нормы на $IPTD$ заключается в определении величин w_i.

Один из способов решения поставленной задачи предложен в рекомендации МСЭ Y.1542. Сначала оцениваются все величины $T_P(i)$. Далее сумма всех значений $T_P(i)$ вычитается из выбранной нормы для исследуемого показателя $IPTD - T_j$. В результате получается величина X_j, которую целесообразно рассматривать как некий запас времени для выполнения функций коммутации в ССП:

$$X_j = T_j - \sum_{\{I\}} T_P(i). \qquad (П7.17)$$

Следующий шаг заключается в оценке среднего времени обработки IP-пакетов $j-го$ класса обслуживания в $i-ом$ компоненте сети на основании структуры ССП и базовых характеристик используемого оборудования коммутации. Для этого необходимо использовать информацию Производителей оборудования, касающуюся длительности обработки IP-пакетов, и знать количество узлов коммутации в $i-ом$ компоненте сети. После выполнения тривиальных арифметических расчетов формируется набор значений $B_j(i)$.

В уже упоминавшейся рекомендации Y.1542 предложено использовать следующее равенство для распределения нормы на $IPTD$ по компонентам сети:

$$T_P(i) + X_j \frac{B_j(i)}{\sum_{\{I\}} B_j(i)} = w_i \left[D_j - T_P(i) \right]. \qquad (П7.18)$$

Из соотношения (П7.18) определяются все коэффициенты w_i, входящие в правую часть формулы (П7.16). Таким образом, задачу распределения нормированного значения показателя $IPTD$ по компонентам сети для $j-го$ класса обслуживания можно считать решенной.

Для показателя $IPDV$ в материалах МСЭ не содержатся предложения, которые можно использовать для декомпозиции данной нормы по компонентам сети. Правда, в рекомендации Y.1542 содержатся сведения о типичном распределении показателя $IPDV$ по иерархическим уровням ССП независимо от класса обслуживания:

- каждая сеть в помещении пользователя – 1%;
- каждая сеть доступа – 40%;
- базовая сеть – 40%.

Если рассматривать соединение вида "точка – точка", именуемое в англоязычной технической литературе как "end-to-end", то сумма перечисленных выше величин составит 122%. Данный факт объясняется характером ФР времени задержки – $F(t)$, получаемой в результате свертки N функций $F_k(t)$. Здесь $k = \overline{1, N}$. Обозначим через a_k и σ_k^2 первый момент и дисперсию случайной величины (в данном примере – времени задержки). Эти

параметры вычисляются в соответствии с известными правилами [23], если задан вид функции $F_k(t)$. Коэффициент вариации исследуемой случайной величины – v_k может быть вычислен так [23]:

$$v_k = \frac{\sigma_k}{a_k}. \qquad (П7.19)$$

При свертке двух функций $F_k(t)$ и $F_{k+1}(t)$ первый момент (a), дисперсия (σ^2) и коэффициент вариации (v) для "новой" случайной величины определяются следующим образом [24]:

$$a = a_k + a_{k+1}, \quad \sigma^2 = \sigma_k^2 + \sigma_{k+1}^2, \quad v = \frac{\sqrt{\sigma_k^2 + \sigma_{k+1}^2}}{a_k + a_{k+1}}. \qquad (П7.20)$$

Предположим далее, что $a_k = a_{k+1}$. В этом случае $a = 2a_k$. Пусть $\sigma_k \geq \sigma_{k+1}$. Это значит, что $v_k \geq v_{k+1}$. Покажем, что $v \leq v_k$. Это несложно сделать, записав выражения для расчета коэффициентов вариации v и v_k:

$$\frac{\sigma_k^2 + \sigma_{k+1}^2}{4a_k^2} \leq \frac{\sigma_k^2}{a_k^2} \quad \rightarrow \quad \sigma_{k+1} \leq \sigma_k\sqrt{3}. \qquad (П7.21)$$

Равенство коэффициентов вариации v и v_k достигается только в том случае, когда величины дисперсии времени задержки σ_k^2 и σ_{k+1}^2 равны нулю. Далее сворачиваемые функции под номерами k и $k+1$ можно свести в одну. Ее следует сравнить с функцией $F_{k+2}(t)$. Несложно убедиться, что получится неравенство, подобное (П7.21). Процедуру данного рода можно продолжить до наступления равенства $k = N$.

Очень интересен – с точки зрения качественного анализа поведения функции $F(t)$ – случай, когда справедливы два равенства: $a_k = a_{k+1}$ и $\sigma_k = \sigma_{k+1}$. В этом случае $v \approx 0,707v_k$. Распространяя рассуждения на случай свертки N идентичных функций, несложно получить следующее соотношение:

$$v = \frac{v_k}{\sqrt{N}}. \qquad (П7.22)$$

Для типичных распределений с уменьшением значения коэффициента вариации снижается величина p-квантиля. Именно эта тенденция позволила МСЭ установить приведенное выше распределение показателя $IPDV$ по компонентам сети, для которого суммарное значение всех слагаемых превышает 100%. Поскольку превышение порога в 100% не столь велико, для гарантированной верхней границы нормы $IPDV$ для каждого $i-го$ компонента сети можно использовать коэффициенты w_i. Они были получены при условии, что сумма долей всех значений $IPDV$ по отдельным компонентам сети равна 100%.

Для показателя $IPLR$ в рекомендации Y.1542 приводится пример разделения на нормы по отдельным компонентам сети. В этом примере рассматривается соединение, устанавливаемое через три сети. Для каждой сети искомая норма определяется как одна треть от нормируемого показателя $IPLR$ (для большинства классов обслуживания он равен 10^{-3}). Строго говоря, такой подход не совсем верен, так как для соединения из N компонентов величина $IPLR$ рассчитывается по вероятности потери IP-пакетов в каждом $i-ом$ компоненте – π_i:

$$IPLR = 1 - \prod_{i-1}^{N}(1 - \pi_i). \qquad (П7.23)$$

Правда, если величины π_i достаточно малы, то вместо выражения (П7.23) можно записать приближенное соотношение:

$$IPLR \approx \sum_{i-1}^{N} \pi_i. \qquad (П7.24)$$

Если, к тому же, все величины π_i примерное равны, то, опуская индекс "i", из формулы (П7.24) можно найти искомую норму:

$$\pi \approx \frac{IPLR}{N}. \qquad (П7.25)$$

Данный подход отличается простотой, но не представляется удачным. Дело в том, что в каждой сети, участвующей в соединении, насчитывается разное количество узлов коммутации. По всей видимости, потенциальным "узким местом", будет именно та сеть, в которой насчитывается максимальное количество узлов коммутации. Кроме того, "узким местом" может стать узел коммутации, который работает с большей нагрузкой.

Представляется целесообразным для каждого $i-го$ компонента соединения ввести весовой коэффициент w_i, определяемый отношением нагрузки узла коммутации, который считается "узким местом" – $\rho_l(i)$, к средней нагрузке сети – ρ. Величина коэффициента w_i определяется очевидным соотношением:

$$w_i = \frac{\rho_l(i)}{\rho}. \qquad (П7.26)$$

Очевидно, что при отсутствии "узких мест" $w_i \equiv 1$. Если величины w_i существенно превышают единицу, то выражение (П7.24) необходимо трансформировать:

$$IPLR \approx \sum_{i-1}^{N} \pi_i w_i. \qquad (П7.27)$$

Способы распределения показателей $IPTD$, $IPDV$ и $IPLR$, предложенные в данном разделе, следует рассматривать как предварительные соображения по методам решения поставленной задачи. Схожее утверждение сформулировано и в текущей (к середине 2011 года) версии рекомендации МСЭ Y.1542. Действительно, необходимо накопить опыт планирования и эксплуатации сетей класса ССП, чтобы уточнить теоретические основы распределения показателей $IPTD$, $IPDV$ и $IPLR$ по отдельным компонентам.

В математике нет символов для неясных мыслей.
(Анри Пуанкаре)

П7.4. Задачи планирования сети с точки зрения показателей QoS

П7.4.1. Распределение трафика между узлами сети

В телефонных сетях распределение вызовов между узлами коммутации или нагрузки (этот термин используется специалистами по ТФОП чаще, чем слово "трафик") принято выражать при помощи матрицы. Для сети, состоящей из N узлов коммутации, потоки вызовов могут быть описаны при помощи матрицы следующего вида [25, 26]:

$$\left\|C_{ij}\right\| = \left\| \begin{matrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \dots & c_{1N} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \dots & c_{2N} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \dots & c_{3N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{N1} & c_{N2} & c_{N3} \dots & c_{NN} \end{matrix} \right\|. \qquad (П7.28)$$

Каждый элемент этой матрицы – c_{ij} представляет собой оценку, которая получена в результате измерений (или иным способом) количества вызовов, направляемых из узла i в узел j. Величины c_{ij} принято определять для ЧНН. В общем случае $c_{ij} \neq c_{ji}$. Величина c_{ii} равна количеству вызовов, устанавливаемых между терминалами узла коммутации под номером "i".

Заменив в матрице (П7.28) каждое значение c_{ij} на соответствующую интенсивность нагрузки – y_{ij}, можно записать распределение нагрузки между N узлами коммутации:

$$\left\|Y_{ij}\right\| = \left\| \begin{matrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} \dots & y_{1N} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \dots & y_{2N} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \dots & y_{3N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{N1} & y_{N2} & y_{N3} \dots & y_{NN} \end{matrix} \right\|. \qquad (П7.29)$$

Следует учитывать, что матрица (П7.28), как правило, содержит более достоверную информацию, так как точность измерений величин c_{ij} весьма высока. Для потерянных вызовов оценка интенсивности нагрузки основывается на усредненных значениях времени занятия. Иными словами, вводится допущение относительно возможной длительности несостоявшихся соединений.

Элементы матрицы потоков IP-пакетов – $\left\|C_{ij}(k)\right\|$ целесообразно рассматривать как векторы. Переменная "k" определяет тип пакета, что позволяет учесть возможность применения приоритетного обслуживания в сети ССП. В матрицах (П7.28) и (П7.29) ситуации, когда $c_{ij} = 0$, практически исключаются. В сети ССП взаимодействие между теми терминалами, которые предназначены для обмена информацией различной природы, предусматривается в редких случаях. Это означает, что могут встречаться равенства вида $c_{ij}(k) = 0$ для некоторых значений k. Матрица $\left\|C_{ij}(k)\right\|$ представима в такой редакции:

$$\left\|C_{ij}(k)\right\| = \left\| \begin{matrix} c_{11}(k) & c_{12}(k) & c_{13}(k) \dots & c_{1N}(k) \\ c_{21}(k) & c_{22}(k) & c_{23}(k) \dots & c_{2N}(k) \\ c_{31}(k) & c_{32}(k) & c_{33}(k) \dots & c_{3N}(k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{N1}(k) & c_{N2}(k) & c_{N3}(k) \dots & c_{NN}(k) \end{matrix} \right\|. \qquad (П7.30)$$

Методы составления матриц (П7.28) и (П7.29) известны [25, 26]. Соответствующий математический аппарат базируется на большом объеме статистических наблюдений. Эти наблюдения позволяют сделать вывод, что принципам распределения информационных потоков в телефонных сетях свойственна одна важная особенность. Закономерности в распределении трафика между узлами коммутации устойчивы и предсказуемы. Подобный вывод для мультисервисного трафика (по крайней мере, в настоящее время) нельзя считать корректным. По всей видимости, сложившееся положение объясняется тем, что мультисервисный трафик существенно "моложе" телефонной нагрузки.

Существует еще один фактор, связанный с зависимостью исходящего или входящего трафика от бизнес-процессов пользователя. Рассмотрим пример организации связи для компании, насчитывающей 100 сотрудников. Предположим, что всем сотрудникам необходимо предоставить телефонную связь за счет установки УАТС и доступ в Internet через локальную сеть.

Обычно интенсивность телефонной нагрузки для одного терминала – при отсутствии информации для достоверной оценки – принимается равной 0,1 Эрл. Для ста терминалов суммарная интенсивность трафика составит 10 Эрл. Для вероятности потери 0,005 по таблицам Эрланга можно необходимое количество СЛ – 20 каналов. Обычно УАТС будет включена в опорную станцию по цифровому тракту. Логично выбрать первичный тракт ЦСП, предоставляющий тридцать СЛ. Это означает, что принятая норма потерь будет соблюдаться даже при росте интенсивности телефонной нагрузки в 1,7 раза.

Многочисленные измерения показывают, что для большинства компаний удельная интенсивность телефонной нагрузки меняется в сравнительно узком диапазоне. Тем не менее, существует ряд исключений. В частности, если бизнес-процессы компании связаны с предоставлением информационных услуг по телефону, то интенсивность удельной входящей нагрузки в ЧНН будет близка к 1 Эрл. Противоположный пример связан с опросом общественного мнения по телефону. В данном случае к 1 Эрл будет близка интенсивность удельной исходящей нагрузки в ЧНН. Доля подобных компаний не так велика. По этой причине интенсивность телефонной нагрузки на один терминал, равную 0,1 Эрл, может считаться типичной величиной. Максимально возможное теоретическое различие с предельным значением трафика составляет один порядок.

Для доступа в Internet это различие может достигать несколько порядков. Если бизнес-процессы компании никак не связаны с информационным обменом, то доступ для одного компьютера через оборудование xDSL может оказаться вполне приемлемым. Будем считать верхней оценкой транспортных ресурсов номинал 2,048 Мбит/с. Если бизнес-процессы компании основаны на работе с большими объемами информации (включая их обработку и обмен через сеть), то может потребоваться подключение на скорости 155 Мбит/с при помощи тракта STM-1. Различие оценок составляет уже два порядка.

Следует подчеркнуть еще одну особенность трафика данных – существенную неравномерность использования ресурсов доступа разными терминалами. Например, в [27] приведены такие результаты измерений: на 5% персональных компьютеров научного центра приходится 80% трафика, а на 60% других терминалов – менее 1%. В телефонии подобные ситуации встречаются очень редко.

Соображения, изложенные выше, приводят к выводу о необходимости тщательного анализа бизнес-процессов потенциальных пользователей, что существенно усложняет планирование сети. Более того, следует учитывать возможность перемещения некоторых групп пользователей в другие (с географической точки зрения) сети доступа при переезде компании в новый офис. Имеющийся опыт показывает, что УАТС, установленные ранее, в большинстве случаев удовлетворяют требования новых пользователей. Иная ситуация складывается с оборудованием обмена данными и с транспортными ресурсами, которые были арендованы для доступа в Internet.

Положение обычно усугубляется тем, что пользователь не способен сформулировать свои потребности относительно скорости доступа в Internet. Для разработки проектных решений в подобных случаях могут использоваться результаты тех проектов, которые уже реализованы и доказали корректность выполненных расчетов. Допустим, что новый проектируемый объект по бизнес-процессам аналогичен N выполненным ранее заказам, доказавшим эффективность принятых решений. Для N заказов диапазон рассчитанных транспортных ресурсов лежит в пределах от B_{MIN} до B_{MAX}. Для нового проекта наиболее вероятное значение необходимых транспортных ресурсов – B_X можно оценить так:

$$B_X = \frac{B_{MAX} + B_{MIN}}{2}. \qquad (П7.31)$$

Набор из N апробированных решений представим в виде гистограммы. Используя правила проведения вычислений характеристик для ступенчатых функций, элементарно определяется коэффициент вариации величины B_X. Если распределение в диапазоне от B_{MIN} до B_{MAX} подчинятся равномерному закону, то коэффициент вариации – v_B можно рассчитать по следующей формуле:

$$v_B = \frac{\left(B_{MAX} - B_{MIN}\right)}{\left(B_{MAX} + B_{MIN}\right)\sqrt{3}}. \qquad (П7.32)$$

Даже в случае близости B_{MIN} к нулю коэффициент вариации не превышает значения 0,7. Такая величина коэффициента вариации считается вполне приемлемой с учетом той степени неопределенности требований, которая свойственна рассматриваемому проекту. На самом деле значения v_B будут существенно ниже. Анализ ряда проектных решений свидетельствует, что коэффициент вариации обычно не превышает 0,25. Это позволяет эффективно использовать результаты накопленного опыта для принятия решений в тех случаях, когда очень сложно сформулировать требования к необходимым транспортным ресурсам, обеспечивающим доступ в Internet.

Использование статистических данных из удачных проектов позволяет постепенно формировать матрицу (П7.30), адекватно отражающую распределение потоков IP-пакетов, которые переносят мультисервисный трафик. Следует учитывать, что значения элементов матриц (П7.28) и (П7.29) слабо зависят от времени [28], если не происходит радикальная реконструкция сети. Для элементов матрицы $\left\|C_{ij}(k)\right\|$ такое утверждение нельзя считать верным.

Минимизация ошибок планирования, касающаяся распределения трафика между узлами сети, обеспечивается за счет функциональных возможностей транспортных колец. В телефонной сети для $i-ой$ МС весьма точно определяются величины интенсивности внутристанционной – Y_i^{BH}, исходящей – $Y_i^{ИСХ}$ и входящей – Y_i^{BX} нагрузки. Если между $i-ой$ и $j-ой$ МС организуется отдельный пучок СЛ, то необходимо точно определить долю нагрузки между этими коммутационными станциями – $Y_{ij}^{ИСХ} = Y_{ji}^{BX}$ и $Y_{ij}^{BX} = Y_{ji}^{ИСХ}$. Эти значения позволяют рассчитать емкости пучков СЛ – $V_{ij}^{ИСХ} = V_{ji}^{BX}$ и $V_{ij}^{BX} = V_{ji}^{ИСХ}$ по первой формуле Эрланга или иным способом.

В том случае, если все смежные МС связаны между собой транспортным кольцом SDH, определение величин вида V_{ij} можно рассматривать как начальное распределение трафика между МС. Далее, методом итераций, осуществляемых установлением новых полупостоянных соединений в МВК, производится изменение элементов V_{ij}. Суть этой операции определяется следующими правилами:

$$V_{ij} \to V_{ij} + n\Delta \quad или \quad V_{ij} \to V_{ij} - n\Delta. \qquad (П7.33)$$

В этом выражении величина Δ соответствует минимальному значению канальных ресурсов, которые перераспределяет МВК. Например, некоторые виды МВК переключают только тракты E1 и или более мощные потоки. В других МВК возможны операции с ОЦК. Множитель n позволяет определить объем транспортных ресурсов, которые добавляются или изымаются между МС с номерами i и j. Кольцевая структура обеспечивает решение двух задач: коррекцию матрицы $\left\|V_{ij}\right\|$ для минимизации ошибок при проектировании и эффективное управление ресурсами транспортной сети при перегрузках или при отказах в инфокоммуникационной системе [29].

П7.4.2. Оценка величины трафика, создаваемого IP-пакетами

Методику оценки объема мультисервисного трафика целесообразно рассматривать при помощи модели, показанной на рисунке П7.8. Она состоит из двух элементов сети – узла доступа и маршрутизатора. В узел доступа включаются терминалы трех типов, которые генерируют трафик трех видов – речь, данные и видео. Наличие компьютерной приставки к телевизору (STB) подчеркивает тот факт, что в сети ССП обеспечивается диалоговый режим и для обмена видеоинформацией.

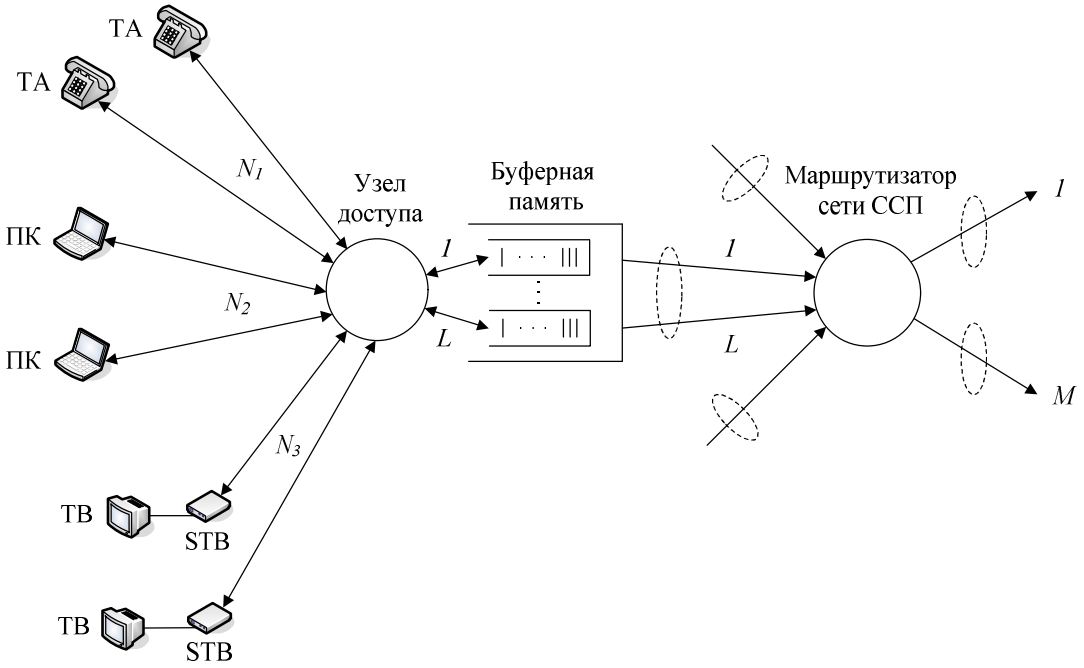


Рисунок П7.8. Обслуживание IP-пакетов разных приоритетов

Рекомендации МСЭ, относящиеся к ССП, подразумевают возможность организации раздельных очередей для эффективной обработки и передачи IP-пакетов, содержащих информацию разного рода. Предположим, что в общем случае может быть создано L таких очередей. Очевидно, что $L \geq 1$. Все IP-пакеты, вне зависимости от номера очереди и приоритета передаются по общему (с точки зрения теории телетрафика) тракту. С этой целью все L направлений объединены эллипсом. В маршрутизатор сети ССП включено множество трактов. Их общее количество определяется численностью узлов доступа, обслуживаемых маршрутизатором. После обработки IP-пакеты распределяются по M направлениям в соответствии с адресом пункта назначения.

Трафик речи передается после окончания процесса установления соединения до завершения разговора. Этот период времени обозначается далее как t_1. Целесообразно предположить, что количество переданных и принятых IP-пакетов будет одним и тем же. Численность IP-пакетов, переданных или полученных за время телефонного разговора – I_1, можно оценить таким выражением:

$$I_1 \approx k_1 h_1 t_1. \qquad (П7.34)$$

Введение коэффициента k_1 позволяет учесть долю эффективного использования канала телефонной связи в одном направлении. Для предположения об идентичности значений времени приема и передачи информации – с учетом пауз в течение разговора – справедливо неравенство $k_1 < 0,5$. Для анализа характеристик СМО при максимальной нагрузке следует использовать равенство $k_1 = 1$. Величина h_1 определяет то количество пакетов, которое передается или принимается за единицу времени. Нижний индекс "1" обозначает

величины, которые относятся к телефонной связи. Индексы "2" и "3" вводятся для услуг, касающихся обмена данными и видеоинформацией соответственно. Мультимедийные услуги с точки зрения трафика можно рассматривать как обмен видеоинформацией.

Для оценки значения h_1 необходимо знать используемый алгоритм формирования речевых пакетов [11]. В ТФОП преобразование речи в поток битов осуществляется так, что скорость передачи цифрового потока – B_1 составляет 64 кбит/с [30]. В процессе формирования IP-пакетов скорость передачи возрастает. С другой стороны, некоторые Операторы связи применяют другие кодеки и оборудование передачи пакетов. Изменение скорости можно учесть множителем – θ_1, который может быть как больше, так и меньше единицы. Допустим, что длина IP-пакета – l_1 постоянна. С учетом принятых обозначений количество IP-пакетов, переданных (как и принятых) в течение телефонного разговора длительностью t_1, определяется следующим образом:

$$I_1 \approx k_1 t_1 \frac{\theta_1 B_1}{l_1}. \qquad (П7.35)$$

Отношение l_1 к B_1 можно считать "длиной" IP-пакета, выраженной в единицах времени – t_{IP}. Тогда формула (П7.35) представима в такой редакции:

$$I_1 \approx \frac{k_1 t_1 \theta_1}{t_{IP}}. \qquad (П7.36)$$

При трехминутном разговоре для $\theta_1 \approx 1$, активности терминала $k_1 = 0,45$ и "длине" IP-пакета $t_{IP} = 30$ мс будет передано 2700 IP-пакетов. Столько же пакетов будет принято, если длительность активного использования установленного разговорного тракта обоими абонентами идентична. Среднее значение интенсивности передачи информации составит 15 пакетов в секунду. Для вычисления суммарной интенсивности обмена IP-пакетами полученное значение следует удвоить.

Оценки, основанные на формуле (П7.35) и ее модификациях, позволяют рассчитать интенсивность обмена пакетами. Для классической телефонии эта величина не зависит от длительности соединения и, тем более, от типа используемого кодека. В ССП, как и в IP телефонии, значение коэффициента θ_1 существенно влияет на численность переданных и принятых пакетов. По этой причине формулу (П7.36) целесообразно привести к такому виду:

$$I_1(i) \approx k_1 t_1^{(1)} \frac{\theta_1(i)}{t_{IP}(i)}. \qquad (П7.37)$$

Индекс "i" принадлежит множеству $\{I\}$, которое включает возможные значения коэффициента $\theta_1(i)$ и "длины" IP-пакета $t_{IP}(i)$. Величина $t_1^{(1)}$ равна среднему значению времени разговора. Количество вызовов, создаваемых терминалом в единицу времени (обычно – за ЧНН), целесообразно оценивать с учетом базовых характеристик кодека. За рассматриваемый период времени с одного терминала может быть установлено несколько типов соединений. Численность соединений каждого типа равна $C_1(i)$. Тогда для одного терминала математическое ожидание суммарного количества переданных IP-пакетов – $I_1^{(1)}$ может рассчитываться следующим образом:

$$I_1^{(1)} = k t_1^{(1)} \sum_{\{I\}} C_1(i) \frac{\theta_1(i)}{t_{IP}(i)}. \qquad (П7.38)$$

Элемент сети, который на рисунке П7.8 именуется узлом доступа, обслуживает N_1 телефонных терминалов. Среднее значение общего количества IP-пакетов, передаваемых в течение среднего времени соединения – $D_1^{(1)}$, определяется умножением величины $I_1^{(1)}$ на N_1:

$$D_1^{(1)} = N_1 k_1 t_1^{(1)} \sum_{\{I\}} C_1(i) \frac{\theta_1(i)}{t_{IP}(i)}. \qquad (П7.39)$$

Величину $D_1^{(1)}$ целесообразно связать с интенсивностью тех IP-пакетов – λ_1, которые порождаются трафиком речи. Для этого необходимо знать тот период времени – T_M, который выбран в качестве единицы измерения. Обычно этот период времени совпадает с ЧНН. Тогда величина T_M равна одному часу. Для IP сети в качестве единицы измерения удобнее выбрать одну секунду. Очевидно, что λ_1 рассчитывается по такой формуле:

$$\lambda_1 = \frac{D_1^{(1)}}{T_M}. \qquad (П7.40)$$

Общее количество принимаемых IP-пакетов и интенсивность соответствующего трафика можно рассчитать по формулам (П7.39) и (П7.40). Подобное утверждение нельзя считать верным для трафика данных и видеоинформации. Для этих видов трафика (им можно приписать индексы $j = 2, 3$) целесообразно определить доли исходящей (uplink) – α_j^{UL} и входящей (downlink) – α_j^{DL} нагрузки. Такой подход важен с двух точек зрения, иллюстрируемых рисунком П7.9. На нем изображены основные варианты организации обработки IP-пакетов. Они различаются только способом реализации устройств, которые обрабатывают IP-пакеты.

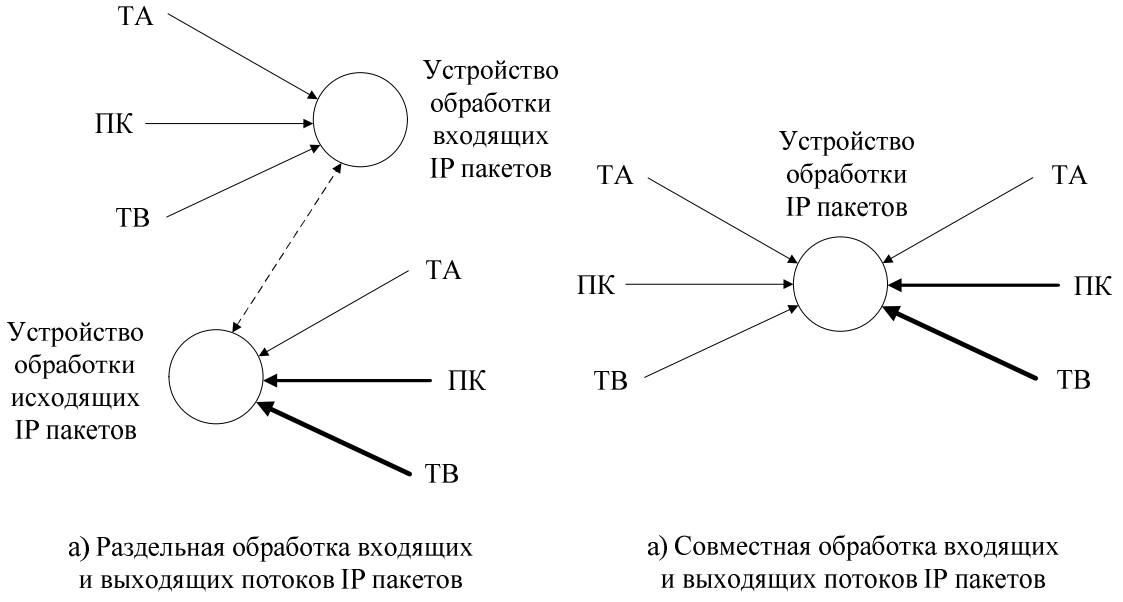


Рисунок П7.9. Варианты обработки IP-пакетов, содержащих мультисервисный трафик

Модель, показанная на рисунке П7.9, полезна для учета асимметричности потоков IP-пакетов, связанных с трафиком данных и видеоинформации. Различие в толщине линий подчеркивает следующий факт: $\alpha_j^{DL} >> \alpha_j^{UP}$. Для оценки численности IP-пакетов, которые связаны с трафиком данных и видео – I_2 и I_3, можно – по аналогии с приведенными выше выражениями – вывести следующие соотношения:

$$I_2 = N_2 k_2 t_2^{(1)} \sum_{\{I\}} C_2(i) \frac{\theta_2(i) B_2(i)}{l_2(i)}, \quad I_2 = N_3 k_3 t_3^{(1)} \sum_{\{I\}} C_3(i) \frac{\theta_3(i) B_3(i)}{l_3(i)}. \qquad (П7.41)$$

Для оценки величин интенсивности трафика – λ_2 и λ_3 следует определить время сеансов связи. Если оно идентично величине T_M, которая была выбрана для телефонии, то:

$$\lambda_2 = \frac{I_2}{T_M}, \quad \lambda_3 = \frac{I_3}{T_M}.$$
(П7.42)

Выражения (П7.40) и (П7.42) позволяют вычислить интенсивность потока IP-пакетов для всех видов трафика в сумме – λ:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3. \qquad (П7.43)$$

Соотношение (П7.43) позволяет оценить пропускную способность транспортных ресурсов ССП и производительность узлов коммутации методами теории телетрафика. Основные соотношения для получения искомых оценок приведены в монографии.

Пропускная способность транспортных ресурсов ССП и производительность узлов коммутации прямо пропорциональны параметру μ. В теории телетрафика он называется интенсивностью обслуживания заявок, под которыми в тексте монографии понимаются IP-пакеты. Величину μ можно представить функцией следующего вида:

$$\mu = f(\lambda_1, ...\lambda_m, x_1, ..., x_n). \qquad (П7.44)$$

Набор величины λ_i $\left(i = \overline{1, m}\right)$ определяет значения интенсивности входящих потоков заявок. Переменные x_j $\left(j = \overline{1, n}\right)$ включают показатели качества обслуживания, а также ряд величин, характеризующих рассматриваемую математическую модель. Простейший пример функции $\mu = f(\lambda_1, ...\lambda_m, x_1, ..., x_n)$ можно привести, используя модель $M/M/1$. В монографии часто приводилась формула для среднего значения времени задержки заявок в такой системе:

$$S^{(1)} = \frac{1}{\mu - \lambda}. \qquad (П7.45)$$

Здесь набор величины λ_i представлен только одним элементом – λ. Переменные x_j также заменены одним значением – $S^{(1)}$, которое следует рассматривать как показатель качества обслуживания. Функция (П7.44) для модели $M/M/1$ определяется элементарно:

$$\mu = \lambda + \frac{1}{S^{(1)}}. \qquad (П7.46)$$

Для более сложных моделей выражение для расчета интенсивности μ в явном виде получить не удается. Приходится численно решать уравнение или систему уравнений. Для ССП нормируется несколько показателей качества обслуживания; в общем случае – K. Используя каждый $i-й$ показатель, можно найти несколько значений μ_i $\left(i = \overline{1, K}\right)$. В этом случае истинное значение μ следует выбирать, руководствуясь очевидным правилом:

$$\mu \geq max\{\mu_i\}, \quad i = \overline{1, K}. \qquad (П7.47)$$

Поиск величины μ можно считать типичной задачей планирования сети. Правда, в некоторых случаях при планировании сети возникает иная задача. Ресурсы сети известны, то есть величина μ определена. Необходимо найти допустимые значения интенсивности

входящего потока заявок – λ. Функция (П7.44) позволяет решить и эту задачу. Только условие (П7.47) меняется:

$$\lambda \le min\{\lambda_i\}, \quad i = \overline{1, K}. \qquad (П7.48)$$

С учетом результатов, изложенных в Приложении 6, верхнюю границу величины μ (и для пропускной способности транспортных ресурсов, и для производительности узлов коммутации) можно получить, предполагая, что используется дисциплина обслуживания IP-пакетов без приоритетов. Тогда интенсивность потока заявок – λ, поступающих в СМО, будет определяться выражением (П7.43). Вероятность того, что в составе IP-пакета содержится информация $i-го$ вида (речь, данные, видео) – P_i определяется при помощи отношения следующего вида:

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\lambda}. \qquad (П7.49)$$

Для среднего времени обслуживания заявок – μ^{-1} с учетом возможных различий в значениях μ_i справедливо такое соотношение [31]:

$$\mu^{-1} = \sum_{i=1}^{3} P_i \frac{1}{\mu_i}. \qquad (П7.50)$$

Полезную информацию и интересные соотношения для оценки параметров трафика в ССП можно найти, например, в [22, 32].

П7.4.3. Анализ предельных значений трафика

Под предельными значениями трафика в этом параграфе подразумеваются такие его величины, которые характерны для любого из двух моментов времени:

- насыщение рынка инфокоммуникационных услуг с точки зрения *парадигмы развития ССП*, принятой международным сообществом – T_1;
- окончание жизненного цикла компонентов инфокоммуникационной системы, определяющих основные затраты Оператора связи – T_2.

Эти моменты времени могут по-разному соотноситься друг с другом. В частности, не исключены неравенства $T_1 > T_2$ и $T_2 > T_1$.

Строго говоря, словосочетание "насыщение рынка инфокоммуникационных услуг" нельзя определить объективно, но с точки зрения значения трафика, который для момента T_1 следует считать предельными, можно ввести достаточно простой критерий. Он будет соответствовать уровню трафика, который порождается при полном удовлетворении всех коммуникативных потребностей абонентов ССП. Предположим, что для этого достаточна скорость доступа на ИПС, равная величине B_{SAT}. Нижний индекс образован от слова *"saturation"* в английском языке – насыщение. Судя по графикам, уже приводившимся в монографии, $B_{SAT} = 100$ Мбит/с. Данную величину можно рассматривать как *максимум максиморум* (maximum maximorum): не всем пользователям необходимы столь мощные транспортные ресурсы. Значению B_{SAT} соответствует величина производительности узла коммутации – C_{SAT}.

Момент времени T_2 важен с экономической точки зрения. Очевидно, что Операторы связи должны так развивать ССП, чтобы значение T_2 превышало срок окупаемости. Если значение T_2 примерно равно величине T_1, что проект следует признать удачным с финансовой точки зрения. Это значит, что основные компоненты сети, которые принесли максимальные доходы, пора менять из-за их физического старения.

Далее будет рассматриваться момент времени T_X, определяемый как $min\{T_1, T_2\}$. Для узла доступа, насчитывающего к этому моменту времени максимально возможное количество ИПС – N_X, необходимо определить следующие величины:

- пропускную способность линии передачи (тракта), которая связывает его с узлом коммутации (граничным маршрутизатором) – B_X;
- производительность аппаратно-программных средств, обрабатывающих все виды IP-пакетов – C_X.

Оценку величин B_X и C_X необходимо осуществлять для ЧНН. В телефонной сети даже в ЧНН количество соединений, установленных в любой момент времени t, заметно уступает общей численности абонентов. Для ССП ситуация будет иной. В вечернее время вероятность активности подавляющего большинства ИПС будет близка к единице. Это утверждение объясняется следующим очевидным фактом: будет включена значительная часть телевизионных приемников и персональных компьютеров (трафик, генерируемый телефонными аппаратами нельзя считать существенным в общем количестве IP-пакетов, циркулирующих в сети). Пусть вероятность активного состояния ИПС определяется величиной P_X, а допустимая нагрузка узла коммутации и линии передачи равна ρ_B и ρ_C соответственно. Тогда величины B_X и C_X можно оценить так:

$$B_X \approx \frac{P_X N_X B_{SAT}}{\rho_B}, \quad C_X \approx \frac{P_X N_X C_{SAT}}{\rho_C}. \qquad (П7.51)$$

Формально соотношения (П7.51) не учитывают того факта, что в ИПС может быть использована только часть имеющихся ресурсов. С другой стороны, вероятность того, что производительность и/или пропускная способность ИПС будет востребована в полном объеме, весьма существенна. Очевидно, что отказ в обслуживании вряд ли приемлем для пользователей. По этой причине введение поправочных коэффициентов, учитывающих долю используемых ресурсов при оценке предельных значений трафика, не требуется.

Величины B_X и C_X, вне всякого сомнения, следует рассматривать как избыточные значения. При реализации проектных решений, основанных на оценках B_X и C_X, будет формироваться запас, который далее обозначается как ΔB и ΔC. Важный вопрос при выборе величин B_X и C_X заключается в оценке стоимости запаса ΔB и ΔC. В третьей главе монографии приведены результаты анализа цен на оборудование систем передачи, используемое и для построения ССП. Они позволяют сделать вывод о том, что даже существенный запас ΔB и ΔC не будет приводить к заметному удорожанию проекта, но позволит снизить уровень риска, обусловленный перегрузкой отдельных фрагментов ССП.

Величины запаса ΔB и ΔC напрямую связаны со значениями допустимой нагрузки ρ_B и ρ_C. Очевидно, например, что двукратный запас ΔB и ΔC позволяет ввести два неравенства следующего вида: $\rho_B < 0,5$ и $\rho_C < 0,5$. Неравенства подобного рода должны соблюдаться в любой СеМО. Различие заключается в численных значениях той величины, которая находится в правой части обоих неравенств. Их целесообразно обозначить как $\rho_{MAX}(B)$ и $\rho_{MAX}(C)$. Эти величины определяются по результатам анализа характеристик СМО и СеМО, приведенным во втором и в шестом Приложениях.

Следует напомнить, что ряд результатов исследования вероятностно-временных характеристик системы сигнализации по общему каналу (они приведены в рекомендациях МСЭ серии Q.700) позволили задать значение вида $\rho_{MAX}(C)$ на уровне 0,2. Правда, такой вывод был сделан с учетом роста сигнального трафика в обозримой перспективе при введении новых функциональных возможностей. Опыт реализации технических средств разного рода, функционирующих как СМО или СеМО с дисциплиной обслуживания, предусматривающей возможность ожидания в очереди, позволяет сделать вывод такого рода: в

ССП целесообразно ограничивать нагрузку на уровне от 0,3 до 0,5. Этот вопрос обсуждается также в третьей главе монографии.

В тот период времени, когда все терминалы активны, потребность в транспортных ресурсах можно представить в таком виде:

- для обслуживания трафика речи – x бит/с;
- для обслуживания трафика данных – $mx\ (m >> 1)$ бит/с;
- для обслуживания трафика видео – $nx\ (n >> 1)$ бит/с;

Допустим, что в ССП используются пакеты одинаковой длины – l. Соотношение переданного количества пакетов за единицу времени представимо в таком виде: $1:m:n$. Тогда за секунду через один ИПС необходимо передать X пакетов, количество которых можно оценить по такой формуле:

$$X = \frac{(1+m+n)x}{l}. \qquad (П7.52)$$

Оценку X можно рассматривать как величину C_{SAT}, которая входит в выражение (П7.51). В качестве примера можно выбрать следующие численные значения: $x \approx 64000$, $m \approx 30$, $n \approx 119$. Тогда при длине пакета в 1000 байт каждую секунду на ИПС необходимо обрабатывать 1200 пакетов. Для сетей с коммутацией каналов производительность измеряется количеством попыток вызова за единицу времени в ЧНН. Для телефонной сети эта величина составляет обычно 5 попыток в час, то есть $1{,}39 \times 10^{-3}$ в секунду. Иными словами, при переходе к ССП очень заметно увеличивается производительность узлов коммутации. Пропускная способность линий передачи также возрастает, но в меньшей степени. Это следует из сравнения величин $B_{SAT} = 100$ Мбит/с и скорости передачи речи по ОЦК – 64 кбит/с.

Численные оценки величин B_X и C_X приведены в таблице П7.2. Все расчеты были выполнены для жилого дома, который начитывает сто домохозяйств. Это означает, что $N_X = 100$. При проведении вычислений были приняты следующие допущения: $P_X = 1$, $\rho_B = \rho_C = 0{,}5$, $B_{SUT} = 100$ Мбит/с, $C_{SAT} = 12500$ пакетов в секунду (соотношение $1:m:n$ было выбрано так, чтобы суммарные транспортные ресурсы составили 100 Мбит/с).

Таблица П7.2 Численные оценки величин B_X и C_X

Численность ИПС (N_X)	Величина B_X	Величина C_X
100	20 Гбит/с	2500000 пакетов/с

Очевидно, что при проектировании ССП и ее компонентов придется оперировать величинами, которые заметно отличаются от значений, характерных для эксплуатируемых ныне сетей с коммутацией каналов. Это утверждение справедливо и для большинства сетей IP телефонии при условии, что они не поддерживают другие виды услуг, которые подразумевают использование широкополосного доступа.

Все допущения, сделанные для проведения расчетов, не следует использовать при выполнении проектных работ. Они полезны только для иллюстрации резкого роста тех величин, которые используют проектировщики. Полученные величины свидетельствуют, что некоторые задачи, типичные для сетей телефонной связи, теряют актуальность. Для трафика речи и пропускная способность транспортных ресурсов, и производительность узлов коммутации незначительны по сравнению с аналогичными величинами, которые необходимы для поддержки услуг, связанных с видеоинформацией и с данными. С другой стороны, чувствительность телефонного разговора к задержкам ставит новые задачи по выбору приоритетной дисциплины для обслуживания трафика речи.

Соотношения (П7.51) и (П7.52) позволяют считать, что значения B_X и C_X связаны между собой линейной зависимостью. Ее можно выразить при помощи коэффициента пропорциональности – k_X :

$$C_X = k_X B_X . \qquad (П7.53)$$

Подобную зависимость несложно установить для маршрутизаторов, поставляемых в настоящее время для IP сетей. С этой целью необходимо проанализировать величины их пропускной способности и производительности, указанные разработчиками для линейки своей продукции.

Соображения, изложенные в данном параграфе, позволяют сделать ряд выводов, которые полезны для анализа трафика в ССП. Во-первых, исследования трафика следует проводить совместно с прогнозированием рынка услуг, а также с анализом сценариев построения и развития ССП. Этот вывод – пример использования междисциплинарного подхода к изучению сложных систем. Во-вторых, численные значения величин, которые характерны для теории телетрафика, возрастают, как минимум, на два порядка. В-третьих, ряд традиционных задач, которые возникли в процессе формирования сетей телефонной связи, теряют свою актуальность при переходе к ССП, но одновременно возникают новые задачи, требующие тщательного изучения.

Новые задачи, актуальные для процесса планирования ССП, можно рассматривать с двух точек зрения. Во-первых, целесообразно выделить направления, которые напрямую связаны с теорией телетрафика, применительно к оценке как пропускной способности транспортных ресурсов, так и производительности узлов коммутации. Во-вторых, весьма интересен перечень задач, напрямую не связанных с теми аспектами планирования сети, которые были перечислены выше. По этой причине классификации новых задач и соответствующим комментариям целесообразно посвятить отдельный раздел.

Будущее – это худшее, что есть в настоящем.
(Гюстав Флобер)

П7.5. Направления дальнейших исследований

Материалы, которыми в настоящее время можно воспользоваться для планирования сетей класса ССП, нельзя определить как набор вполне приемлемых инструментов для решения возникающих задач. Сложившееся положение объясняется рядом причин. На мой взгляд, основной причиной стало отсутствие полноценных исследований *системного характера*. В свою очередь, "пауза" в серьезных исследовательских работах, длящаяся около двадцати лет, возникла благодаря одновременному охлаждению к деятельности подобного рода Администрации связи страны и значительной группы ученых, нашедших финансово привлекательные сферы приложения своего интеллекта. Пока не чувствуется желание обеих сторон (принимать в расчет декларации нет смысла) исправить ситуацию. Остается надеяться на активность аспирантов и малочисленной группы ученых, которые вопреки сложившимся условиям продолжают заниматься научными исследованиями.

Цель данного раздела заключается в постановке задач, связанных с дальнейшими исследованиями, которые направлены на совершенствование методов планирования сетей класса ССП. Хочется надеяться, что эти задачи привлекут внимание аспирантов и их руководителей. Не исключено, что некоторые задачи будут интересны и докторантам. Классификация новых задач приведена на рисунке П7.10. Для большинства этих задач определение "новые" следует рассматривать как условное. Кроме того, как будет ясно из дальнейших рассуждений, некоторые задачи выходят на рамки тех вопросов, которым посвящена данная монография.

Рисунок П7.10. Классификация новых задач планирования сетей класса ССП

Предлагаемая классификация сначала делит все задачи на три основные группы. В первую группу входят задачи *подготовки исходных данных*. Задачи *планирования сети* образуют вторую группу. Третья группа задач связана с *управлением сетью*.

Подготовка исходных данных для планирования современных сетей электросвязи – очень сложный процесс. Правда, с этим утверждением редко соглашаются специалисты, которые никогда не были вовлечены в данный процесс. Сложности начинаются уже на этапе формирования перечня необходимых сведений. Наилучшее решение – получение доступа к базе данных, в которой хранятся все сведения об эксплуатируемых сетях, но это не означает, что будет известна вся необходимая информация. В частности, для решения прогностических задач обычно требуются данные, которые не собираются Операторами телекоммуникационных сетей и Поставщиками услуг. Кроме того, все исходные данные, полученные из любых источников, необходимо проверить с целью выявления ошибок. К сожалению, эту операцию обычно приходится осуществлять, используя эвристические методы.

Разработка системного проекта может быть начата до получения необходимых данных, если такая возможность вытекает из сути ТЗ. При разработке системного проекта существенна роль специалистов, которые заняты формированием ключевых принципов построения сети. Этот вид деятельности в англоязычной литературе именуется "tech art" – *техническое искусство*. Именно так предложил профессор Л.Е. Варакин рассматривать задачи выбора системно-сетевых решений, для решения которых формализованные (экономико-математические) методы, как правило, малоэффективны [33]. Тем не менее, совсем без математических методов разработка системного проекта невозможна. Здесь важные функции принадлежат *системным алгоритмам*, о которых речь пойдет ниже. Факт связи двух упомянутых блоков на рисунке П7.10 подчеркивает пунктирная линия со стрелками.

Прогнозирование развития ССП следует рассматривать как одну из самых важных задач на перспективу. Хорошо известна поговорка: "Проблемы надо решать по мере их поступления". Следование этому принципу при планировании больших и сложных систем может привести к катастрофическим последствиям. По всей видимости, разработку новых

методов для получения достоверных прогностических оценок (хотя бы для "попадания в порядок") можно считать одной из самых актуальных задач.

Разработка сценариев реализации проекта подразумевает тщательный анализ ряда альтернатив. В этом случае появляется реальная возможность демпфировать последствия ошибок прогнозирования или изменения требований к проекту. При разработке сценариев целесообразно ориентироваться на поиск устойчивых (рациональных) решений, который сформулирован в первой главе монографии.

Системные алгоритмы, уже упоминавшиеся в этом разделе, размещены на рисунке П7.10 сразу после блока "Планирование сети". Сложность их разработки определяется несколькими факторами. Во-первых, суть этих алгоритмов определяется сферой "tech art", что вносит определенный элемент субъективизма в последующие процессы планирования сети. Во-вторых, необходимо учитывать следующее важное обстоятельство: реализация большинства предложений будет осуществляться за счет применения *вычислительных алгоритмов*. Это означает, что последний шаг в каждом системном алгоритме должен быть направлен на получение конкретного результата (расчет какой-либо величины, установление зависимости и тому подобное). В-третьих, в системных алгоритмах должны учитываться не только требования по построению сети, но и процессы ее технической эксплуатации. В качестве одного из важнейших примеров на рисунке П7.10 показан блок "Предотвращение перегрузки сети". Он входит в состав задач *управления сетью*. Связь между двумя блоками изображена пунктирной линией со стрелками.

Вычислительные алгоритмы целесообразно разделить на несколько видов. В этой монографии рассматриваются два основных вида вычислительных алгоритмов, которые ориентированы на выбор структуры сети класса ССП и на расчет пропускной способности транспортных ресурсов, а также производительности узлов коммутации соответственно. Эти алгоритмы требуют решения множества сложных задач с использованием методов теорий графов, телетрафика и других. Пожалуй, большинство новых исследований будет связано именно с вычислительными алгоритмами.

Алгоритмы интерпретации, на первый взгляд, представляются очень простыми. В ряде случаев предположение такого рода следует признать справедливым. Например, если получено значение требуемой интенсивности обслуживания IP-пакетов – μ, то расчет производительности узла коммутации становится тривиальной задачей. Однако введение приоритетного обслуживания некоторой части IP-пакетов заметно усложняет алгоритм интерпретации [33]. В теории математических моделей [34] алгоритмам интерпретации уделяется особое внимание. Можно констатировать, что разработка этих алгоритмов для процессов планирования сетей класса ССП весьма актуальна.

Предотвращение перегрузки сети всегда считалось одной из самых актуальных задач для всех интерактивных систем [35, 36]. Судя по опыту эксплуатации пакетных сетей, задачи предотвращения перегрузки в ССП заметно усложняются. В этой области можно рассчитывать на формирование новых направлений научных исследований. Они, скорее всего, будут связаны с новыми подходами к разработке алгоритмов управления сложными системами [37].

Прогнозирование нештатных ситуаций – эффективный способ для превентивного предотвращения перегрузок. Большинство возникающих задач может быть решено за счет интеллектуальной обработки данных [38], генетических алгоритмов [39], нейронных сетей [40], а также других методов. Безусловно, методы прогнозирования нештатных ситуаций, используемые в сетях телефонной связи, могут применяться и в дальнейшем при условии их модификации с учетом различного рода обстоятельств. Например, в Северной Америке в центрах управления междугородной сетью телефонной связи установлены экраны, на которых транслируется канал CNN. Если в пределах континента или в мире возникает какая-либо проблема, способная породить лавинообразный поток вызовов (землетрясение, цунами, террористический акт и им подобные катастрофы), то персонал центров управления очень быстро получает соответствующую информацию. Он начинает заранее пере-

ключать все имеющиеся ресурсы для обеспечения максимальной пропускной способности телефонной сети в направлении той точки, куда пойдет лавинообразный поток вызовов.

Поддержка соглашений SLA становится важным инструментом конкуренции за клиентов, приносящих Оператору связи существенные доходы. Практика заключения этих соглашений хорошо изложена в технической литературе [41]. Теоретические положения, касающиеся формирования оптимальных соглашений SLA, а также методы обеспечения заданных показателей качества обслуживания, проработаны менее основательно. Здесь можно найти ряд новых научных задач, имеющих важное практическое значение.

Литература к Приложению 7

1. Т.И. Алиев. Основы моделирования дискретных систем. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009.
2. Г.П. Башарин, А.Л. Толмачев. Теория сетей массового обслуживания и ее приложения к анализу информационно-вычислительных систем. – Итоги науки и техники. Серия "Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика", 1983, том 21.
3. Г.П. Башарин, П.П. Бочаров, Я.А. Коган. Анализ очередей в вычислительных сетях. Теория и методы расчета. – М.: Наука, 1989.
4. П.П. Бочаров, А.В. Печинкин. Теория массового обслуживания. – М.: РУДН, 1995.
5. В.М. Вишневский. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: издательство "Техносфера", 2003.
6. В.А. Жожикашвили, В.М. Вишневский. Сети массового обслуживания. Теория и применение к сетям ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988.
7. В.А. Ивницкий. Теория сетей массового обслуживания. – М.: издательство Физматлит, 2004.
8. В.А. Диткин, А.П. Прудников. Интегральные преобразования и операционное исчисление. – М.: Наука, 1974.
9. Л. Клейнрок. Теория массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1979.
10. ITU-T. Definition of categories of speech transmission quality. Recommendation G.109. – Geneva, 1999.
11. Б.С. Гольдштейн, А.В. Пинчук, А.Л. Суховицкий. IP телефония. – М.: Радио и связь, 2001.
12. А.В. Коган. IP-телефония: оценка качества речи. – Технологии и средства связи, №1, 2001.
13. ITU-T. Network performance objectives for IP-based services. Recommendation Y.1541. – Geneva, 2006.
14. ITU-T. Internet Protocol Data Communication Service – IP Packet Transfer and Availability Performance Parameters. Recommendation Y.1540. – Geneva, 2007.
15. ITU-T. Error performance parameters and objectives for international, constant bit rate digital paths at or above the primary rate. Recommendation G.821. – Geneva, 2002.
16. ITU-T. Information technology – Open Systems Interconnection – Basic reference model: The basic model common text with ISO/IEC. Recommendation X.200. – Geneva, 1994.
17. ETSI. Telecommunications and Internet Protocol Harmonization over Networks (TIPHON) Release 3; End-to-end Quality of Service in TIPHON Systems; Part 2: Definition of Speech Quality if Service (QoS) Classes. – TS 101 329-2, 2001.
18. Н.А. Соколов. Телекоммуникационные сети. – М.: Альварес Паблишинг, 2004.
19. ETSI. Telecommunications and Internet Protocol Harmonization over Networks (TIPHON) Release 3; End-to-end Quality of Service in TIPHON Systems; Part 7: Design guide for elements of a TIPHON connection from end-to-end speech transmission performance point of view. – TR 101 329-7, 2002.

20. ITU-T. The E-model, a computational model for use in transmission planning. Recommendation G.107 – Geneva, 2009.
21. ITU-T. Framework for achieving end-to-end IP performance objectives. Recommendation Y.1542. – Geneva, 2006.
22. Ю.Ф. Кожанов. Интерфейсы и протоколы сетей следующего поколения. – СПб.: Альфарет, 2006.
23. Р.Н. Вадзинский. Справочник по вероятностным распределениям. – СПб.: Наука, 2001.
24. Е.С. Вентцель. Теория вероятностей. – М.: издательский центр "Академия", 2005.
25. Б.С. Лившиц, А.П. Пшеничников, А.Д. Харкевич. Теория телетрафика. – М.: Связь, 1979.
26. Ю.Н. Корнышев, А.П. Пшеничников, А.Д. Харкевич. Теория телетрафика. – М.: Радио и Связь, 1996.
27. С.В. Ломакин. Некоторые данные анализа внешнего трафика сети научного института. – IX Международная конференция "Проблемы функционирования информационных сетей", Новосибирск, 2006.
28. CCITT. General Network Planning. – ITU, Geneva, 1983.
29. Н.А. Соколов, Р.Д. Рерле. Управление емкостью пучка в цифровых кроссовых узлах. – Труды четвертого международного семинара по теории телетрафика и компьютерному моделированию (МСТТКМ-4), Москва, 1992.
30. Дж. Беллами. Цифровая телефония. Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986.
31. Г.П. Башарин, А.Д. Харкевич, М.А. Шнепс-Шнеппе. Массовое обслуживание в телефонии. – М.: Наука, 1968.
32. А.Н. Соколов. Оценка параметров задержки приоритетных пакетов в IP-сетях. – Электросвязь, 2011, № 5.
33. Н.А. Соколов. Эволюция задач проектирования телекоммуникационных сетей. – Connect! Мир связи, 2008, №5.
34. А.Д. Мышкис. Элементы теории математических моделей. – М.: Книжный дом "Либриком", 2011.
35. В.Г. Лазарев, Г.Г. Савин. Сети связи, управление и коммутация. – М.: Связь, 1973.
36. Я.С. Дымарский, Н.П. Крутякова, Г.Г. Яновский. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи. – М.: "Мобильные коммуникации", 2003.
37. Ф.П. Тарасенко. Прикладной системный анализ. – М.: Кнорус, 2010.
38. И.А. Чубукова. Data Mining: учебное пособие. — М.: БИНОМ: Лаборатория знаний, 2006.
39. Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. Генетические алгоритмы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010.
40. В.И. Комашинский, Д.А. Смирнов. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003.
41. О.И. Фаерберг, В.О. Шварцман. Качество услуг связи. – М.: ИРИАС, 2005.

Нету ничего опаснее, как
на все сделать регламенты.
(Екатерина Вторая)

Приложение 8. Краткая информация о сетях доступа

Всяка доля по уму:
И хорошая, и злая.
(Борис Чичибабин)

П8.1. Исторические аспекты

История публикаций, посвященных сетям доступа, примечательна одним фактом. С середины тридцатых годов XX века проводились серьезные исследования принципов оптимального построения сетей доступа. Основные результаты можно найти в статьях и монографиях, изданных до середины семидесятых годов. Специалистам, интересующимся процессами появления и эволюции идей по развитию сетей доступа, будут полезны книги [1] и [2]. Далее поток работ, отличающихся оригинальными идеями по построению сетей доступа, методам их расчета, применению современных технологий, стал скромнее. В чем заключалась основная причина? И почему период "молчания" сменился обильным потоком публикаций, содержащих, правда, многочисленные повторы? Ответы на этот вопрос не так прост. В этом Приложении рассматривается ряд аспектов развития сетей доступа, существенных с точки зрения эволюции инфокоммуникационной системы в целом.

Первые сети телефонной связи создавались в городах. О междугородной и, тем более, международной связи могли рассуждать либо дилетанты, либо очень дальновидные ученые. В городах обычно устанавливалась одна телефонная станция. Это означает, что первые ГТС были нерайонированными [2]. Система связи состояла из трех основных элементов: терминал, сеть доступа и коммутатор, работа которого была невозможна без участия человека.

Сеть доступа представляла собой совокупность абонентских линий (АЛ). Первые АЛ были созданы на базе воздушных линий связи. В [3] приводятся интересные сведения о строительстве телефонной сети в Санкт-Петербурге: "... вся сеть проектировалась на столбах по однопроводной схеме с использованием гальванизированной проволоки диаметром 2,2 мм". Подобный подход был типичен в конце XIX века и в начале прошлого столетия. Провода обычно подвешивались на столбах. Подведение проводов к телефонной станции осуществлялось через специальные стойки. Суммарное число проводов, которые должны были подключаться к коммутаторам, исчислялось десятками и даже сотнями. Высота соответствующих стоек на некоторых телефонных станциях достигала 13 метров [4].

С 1886 года в российских ГТС стали использоваться двухпроводные АЛ. Этот процесс стимулировал переход к двухпроводной коммутации. Переход от воздушных линий связи к кабельным начался со второй попытки. Подземный телефонный кабель был впервые проложен в России в 1885 году при строительстве Нижегородской телефонной сети [4]. Длина десятижильного кабеля составляла около одного километра. Прокладка стоила дорого, а при эксплуатации кабеля возникли очень сложные проблемы. Поэтому дальнейшее развитие сетей доступа осуществлялось за счет воздушных линий или кабелей, подвешиваемых на столбах.

Необходимость в создании кабельной канализации стала очевидной в результате стихийного бедствия 21 ноября 1902 года. Оно парализовало работу телефонной сети в столице Российской Империи [3]. Сильное обледенение привело к тому, что почти четыре тысячи проводов были оборваны и перепутаны. В следующем году из-за обледенения произошло сразу 28367 обрывов! Огромная величина для сети, обслуживающей чуть более пяти тысяч абонентов.

Историю развития сети доступа можно проиллюстрировать при помощи графика, который приведен в верхней части первого рисунка. Нижний график отражает основные вехи эволюции систем коммутации.

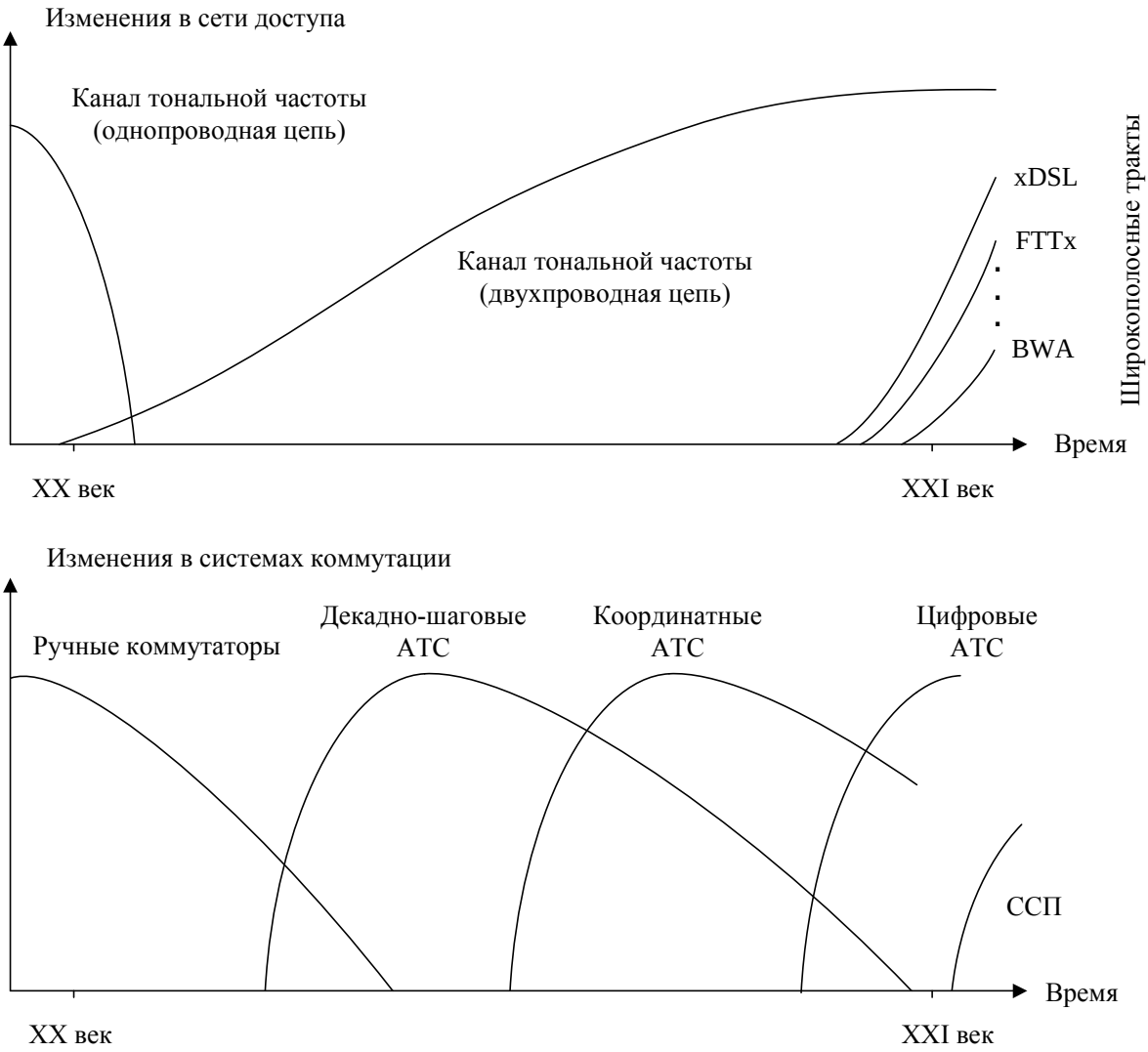


Рисунок П8.1. Основные этапы развития сетей доступа и систем коммутации

Начнем с нижнего графика. Ручные коммутаторы, установленные в ГТС, стали основой ТФОП. Позже они были вытеснены автоматическими телефонными станциями. На рисунке показаны три типа АТС: декадно-шаговые, координатные и цифровые. В разное время они занимали лидирующее положение на рынке оборудования коммутации. Кроме того, в телефонных сетях применялись машинные АТС. Между координатными и цифровыми АТС на телекоммуникационном рынке в небольших объемах появилось квазиэлектронное коммутационное оборудование.

Цифровые системы коммутации – последнее поколение АТС. Им на смену пришли системы распределения информации, отвечающие требованиям ССП.

Можно утверждать, что за более чем столетний период в системах коммутации периодически происходили заметные изменения. Развитию сетей доступа свойственны иные законы. После появления двухпроводных АЛ, используемых для организации канала ТЧ, начался период, который можно считать стагнацией. Двухпроводные физические цепи надолго стали практически единственным средством построения сетей доступа. Хорошо известно [5, 6], что такой способ построения сети доступа экономически неэффективен, но альтернативных решений никто не нашел.

Сложившаяся ситуация объяснялась двумя причинами. Во-первых, высокие цены на оборудование передачи и коммутации не позволяли эффективно строить сети доступа за счет установки выносных концентраторов. Во-вторых, основные услуги, которые были востребованы абонентами, могли предоставляться за счет пропускной способности канала ТЧ, специфицированного для телефонной связи. Эти услуги не всегда имели отношение к

трафику речи. Сеть доступа использовалась для телеграфной связи, для передачи данных с низкой и средней скоростями, а также для охранной сигнализации.

За два последних десятилетия XX века существенно снизились цены на цифровые системы передачи [7]. Были разработаны цифровые системы коммутации, содержащие в своем составе выносные концентраторы [8]. В результате появилась возможность снизить затраты на построение сети доступа даже при неизменном перечне услуг, предлагаемых абонентам ТФОП.

Затем начал формироваться платежеспособный спрос на услуги, поддержка которых потребовала существенного расширения полосы пропускания сети доступа. Эти услуги, в конечном счете, можно отнести к функциональным возможностям "*triple-play service*", которые подразумевают возможность обмена информацией в трех видах: речь, данные и видео [9]. Достижения телекоммуникационных технологий позволили разработать ряд новых вариантов модернизации сетей доступа. В некоторых из них полностью или частично использовались уже эксплуатируемые многопарные кабели. Другие решения опирались на иные среды распространения сигналов.

Период стагнации сменился почти одновременным появлением множества решений, среди которых на верхнем графике выделены только три крупных направления:

- xDSL – совокупность технологий, позволяющих организовать цифровой тракт по физическим цепям, используя стандарт "x";
- FTTx – ряд решений, подразумевающих доведение кабеля с оптическими волокнами до некоторой точки "x", после которой информация передается с использованием другой среды распространения сигналов;
- BWA – широкополосные беспроводные средства доступа, ориентированные на подключение терминалов без использования кабелей связи.

Выбор оптимального решения для модернизации сети доступа зависит от многих факторов. В первую очередь, следует уяснить те требования инфокоммуникационной системы, которые предъявляются к перспективным сетям доступа.

Рекомендуется всегда правильным считать то, что будет.
(Вильгельм Швебель)

П8.2. Требования инфокоммуникационной системы

Термин "инфокоммуникации" появился в технической литературе недавно [10]. Обычно он используется в тех случаях, когда необходимо подчеркнуть, что для системы, сети, услуги или технологии весьма существенно то влияние, которое оказывают друг на друга информатика и связь. Для сети доступа среди множества процессов, которые свойственны развитию инфокоммуникационной системы, особый интерес представляют следующие тенденции:

- рост (как правило, очень существенный) пропускной способности трактов обмена информацией;
- повышение требований некоторой группы пользователей к показателям качества обслуживания;
- поддержка функций мобильности терминала [11] для ряда приложений, включая функциональные возможности triple-play service;
- снижение затрат, необходимых для создания и дальнейшей модернизации всех элементов инфокоммуникационной системы.

Рост пропускной способности трактов обмена информацией подтверждается рядом прогностических оценок [12, 13], которые показаны на рисунке П8.2 (эта иллюстрация приведена также в Приложении 4). Прогноз был разработан компанией Technology Future Inc. для пользователей квартирного сектора в США. Существенно то, что на оси ординат показана доля домохозяйств (например, квартир или индивидуальных домов), а не пользователей. Кстати, телефонную плотность для фиксированной сети чаще оценивают не на

100 жителей, а на 100 домохозяйств. При отсутствии коммунальных квартир это эквивалентно расчету на 100 семей. Данный подход основан на разумном предположении, что если домохозяйство (постоянное или временное) подключено к телефонной сети, то всем его обитателям, независимо от их численности, обеспечен доступ к ТФОП.

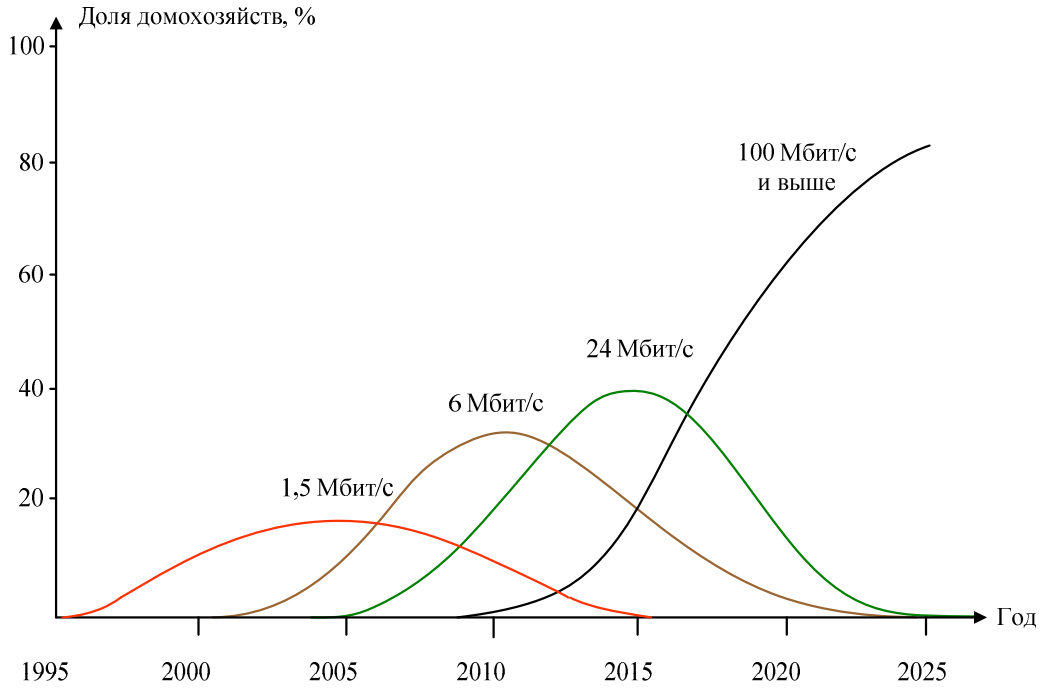


Рисунок П8.2. Изменение требований к полосе пропускания сети доступа

Столь существенный рост пропускной способности обусловлен, в основном, тремя тенденциями:

- переход к стандартам телевидения высокой четкости, для которого необходимы широкополосные каналы;
- повышение скорости обмена данными в Internet для поддержки информационных услуг и новых видов игровых приложений;
- развитие рынка M2M (*machine to machine*), для которого количество терминалов в одном домохозяйстве существенно превышает численность проживающих в нем людей.

Следует отметить, что скорость 100 Мбит/с (верхний предел для последней кривой) совпадает с максимальной пропускной способностью для перспективных сетей мобильной связи [14]. Хотя такая скорость представляется более чем достаточной, некоторые специалисты считают, что определенной группе пользователей потребуются ресурсы доступа порядка 200 Мбит/с [15]. В ряде публикаций и презентаций встречается величина 1 Гбит/с.

Рост требований к качеству обслуживания – естественное явление. В последние годы чаще других обсуждаются аспекты повышения надежности инфокоммуникационной системы. В технической литературе появилось новое словосочетание: "Пять девяток". Речь идет о величине коэффициента готовности между двумя терминалами пользователей, при помощи которых происходит обмен информацией.

На рисунке П8.3 показано распределение причин, по которым абоненты ТФОП не могут обмениваться информацией. Эти оценки были получены ISO (Международная организация по стандартизации) в результате обработки статистической информации, предоставленной несколькими Операторами из разных стран [16]. Следует отметить, что в отечественных системах сигнализации передача по АЛ сообщения "Сигнал об аварии" не предусмотрена.

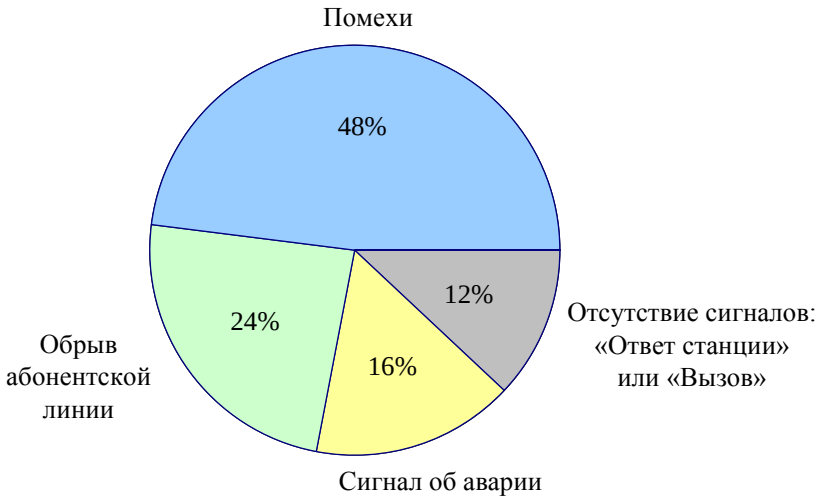


Рисунок П8.3. Причины отказа в обслуживании абонентов ТФОП

Практически четверть отказов в обслуживании обусловлена обрывом АЛ – основой сети доступа в ТФОП. Для коэффициента готовности, равного 0,99999, длительность простоя в течение года не должна превышать 5,3 минуты. Без улучшения характеристик надежности сети доступа выполнить это требование не представляется возможным.

Мобильность – одно из важнейших направлений развития инфокоммуникационной системы [17]. Несколько сложных задач, касающихся поддержки мобильности терминала, приходится решать на уровне доступа. Более того, если бы инфокоммуникационная система до начала формирования массового спроса на услуги мобильной связи отвечала ряду требований (в частности, стопроцентная цифровизация и полноценная реализация системы общеканальной сигнализации), то многие задачи Оператора ограничились бы модернизацией сети доступа и коммутационных станций.

Сети мобильной связи изначально создавались для обслуживания трафика речи. Их дальнейшая эволюция связана с функциональными возможностями triple-play service. С этой точки зрения сети фиксированной и мобильной связи можно рассматривать как конвергентные. Действительно, в современных сетях мобильной связи предоставляются возможности, близкие triple-play service. Ранее подобные виды обслуживания считались прерогативой сетей фиксированной связи. С другой стороны, ряд функций мобильной связи уже стали доступны в фиксированных сетях [11, 18]. В частности, некоторые беспроводные терминалы позволяют перемещаться в пределах территории жилища. Ряд новых видов оконечных устройств обеспечивает возможность обмена сообщениями SMS. Популярность этого вида обслуживания стала сюрпризом для многих специалистов по новым услугам в ТФОП.

Одно из основных экономических требований инфокоммуникационной системы – снижение затрат на построение сети доступа. Для оценки доли затрат, приходящихся на эксплуатируемые сети доступа в ТФОП, целесообразно воспользоваться данными МСЭ, которые были собраны по шестнадцати странам в 1964 году [5]. Из этих данных следует исключить стоимость терминального оборудования. Благодаря новым функциональным возможностям (например, в случае применения беспроводного телефона стандарта DECT с цифровым автоответчиком) может достигать внушительных величин. Пересчитанные результаты приведены в первой таблице.

Таблица П8.1. Распределение затрат между компонентами ТФОП

Статьи затрат	Доля затрат
Линейные сооружения местной сети	31%
Коммутационное оборудование	31%
Междугородные и международные каналы	26%
Здания и земля	12%

Статья затрат "Линейные сооружения местной сети" относится к двум компонентам: сеть доступа и межстанционные соединительные линии. Оценка длин эти двух типов линий и их количества позволяет провести распределение затрат, которые составляют в сумме 31% от общего объема инвестиций, необходимых для построения ТФОП. В частности, в [2] для городской телефонной сети емкостью 40000 номеров, в которой функционируют пять коммутационных станций, получена такая оценка: 80% суммарной длины всех линий (физических цепей) приходится на сеть доступа. Это означает, что затраты на сеть доступа можно оценить на уровне 25% инвестиций, требуемых для создания ТФОП.

Эта величина близка к оценкам из ряда публикаций, в которых исследовались затраты на сеть доступа. В [19] эта доля затрат оценивается в 30% от суммарных инвестиций Оператора, а в [20] определен такой диапазон ее изменений: от 19,6% до 30,34%. Статистика МСЭ [5], кроме доли суммарных затрат на сеть доступа и межстанционные линии, содержит также оценку диапазона исследуемой величины: от 14% до 48%. Очевидно, что доле затрат на сеть доступа, которую можно рассматривать как случайную величину, свойственна весьма существенная дисперсия. Особенно велики отклонения от среднего значения в сельских телефонных сетях [21].

Приведенные оценки (напомним, что они датируются 1964 годом), касаются сетей доступа, построенных в виде совокупности физических цепей. Эти цепи, как правило, создавались за счет прокладки многопарного кабеля с медными жилами. Медь, как известно, дорожает. В то же время, новое поколение систем коммутации и передачи позволяет снизить соответствующие затраты – третья и четвертая строки в первой таблице. Поэтому стоимость сети доступа, построенной за счет прокладки многопарных кабелей с медными жилами, постепенно возрастает.

Любопытно, что другой принцип классификации затрат приводит к схожим оценкам. Например, в седьмом номере журнала "Стандарт" за 2010 год были приведены такие данные аналитической группы Prime Business Group по затратам на построение сети:

- 35% – оборудование;
- 25% – программное обеспечение;
- 40% – линии связи.

Очевидно, что требования поддержки широкополосных услуг, высокой надежности и мобильности подразумевают достаточно высокие тарифы на инфокоммуникационные услуги. Оплачивать услуги по высоким тарифам готовы далеко не все пользователи. Для Операторов связи и Поставщиков услуг интересен анализ потенциальной клиентской базы, который позволяет выделить группы с идентичным уровнем платежеспособного спроса.

Графики, приведенные на рисунке П8.2, позволяют говорить о скором появлении пользователей, для которых необходимы скорости обмена данными в десятки Мбит/с. Доля пользователей, заинтересованных в максимальных скоростях обмена информацией и готовых оплачивать соответствующие услуги, вряд ли будет заметной (по крайней мере, на начальном этапе модернизации сети доступа). С другой стороны, доходы Оператора, которые будут получены от этих пользователей, могут стать существенными.

Значительная группа пользователей по различным причинам (например, уровень коммуникативных потребностей и финансовые возможности) ограничится ресурсами канала ТЧ. В цифровой телефонии это эквивалентно обмену информацией со скоростью 64 кбит/с. Таким образом, различие в скоростях обмена информацией будет измеряться несколькими порядками.

Кроме скорости обмена информацией различия между пользователями с точки зрения Оператора будут заключаться в уровне платы за обслуживание. Существенны как виды устанавливаемых соединений (местные, междугородные, международные), так и их длительность. Важен также спектр используемых дополнительных услуг. В последнее время большое внимание уделяется информационным и развлекательным услугам [22, 23].

Пользователей сначала делили на две группы: деловая (business) и квартирная (residential). Такой подход был приемлем на определенном этапе развития ТФОП. Затем потребовалось ранжирование абонентов деловой группы. В качестве классификационного признака была выбрана численность обслуживаемых пользователей. Очевидно, что для современной инфокоммуникационной системы необходимы принципы ранжирования, основанные на экономических показателях.

Для ранжирования пользователей может применяться метод, базирующийся на формуле Стерджеса [24]. Однако этот метод редко используется в практической работе. В последнее время получил распространение подход, который иллюстрируется рисунком П8.4. Как правило, достаточно выделить пять групп потенциальных пользователей.

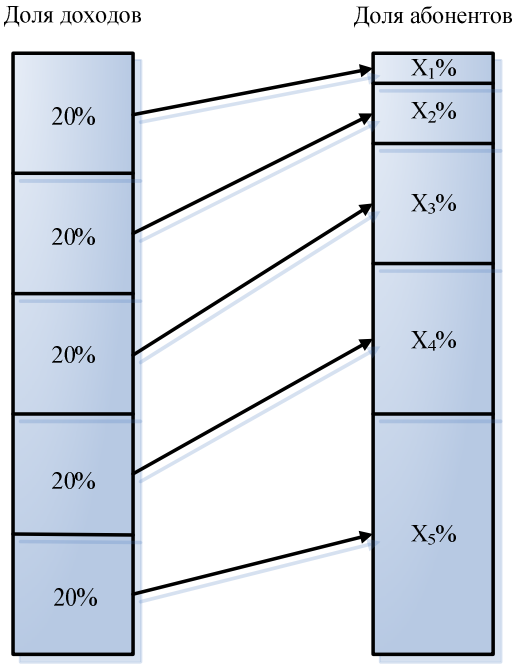


Рисунок П8.4. Выделение пяти групп потенциальных пользователей

По записям, хранящимся в базе данных обслуженного трафика, легко определяются минимальные – D_{MIN} и максимальные – D_{MAX} доходы Оператора. Следует отметить, что величина минимальных доходов может быть отрицательной. Разницу $D = D_{MAX} - D_{MIN}$ необходимо разделить на количество выделенных групп. Для каждой группы элементарно определяется доля потенциальных пользователей – X_j. Для среднестатистической сети доступа справедливо такое неравенство: $X_1 < X_2 < X_3 < X_4 < X_5$.

Оператор очень заинтересован в удержании пользователей, входящих в группы X_1 и X_2. Основные усилия конкурентов направлены на переключение в их сети клиентов, принадлежащих к этим же группам.

Сложность практического анализа заключается в том, что все пять величин X_j зависят от времени. Практический пример такой зависимости – строительство комплекса элитных жилых домов в границах пристанционного участка коммутационной станции ТФОП. В подобных случаях велика вероятность заметного роста величин X_1 и X_2. Соответственно снижаются доли X_3, X_4 и X_5.

Диверсификация пользователей усложняет принципы планирования сети доступа, используемые в настоящее время. Эти принципы были разработаны для ТФОП. Они не предполагали ощутимых различий между абонентами и изменения требований к сети. При планировании сетей доступа, удовлетворяющих всем базовым требованиям к современной инфокоммуникационной системе, необходимо учитывать диверсификацию пользователей.

Сети доступа должны адаптироваться к меняющимся требованиям с минимальными затратами.

Гораздо легче строить вновь,
Чем перестраивать старое.
(Александр Бестужев-Марлинский)

П8.3. Услуги и технологии

Для изложения соображений, касающихся сети доступа и поддерживаемых услуг, целесообразно воспользоваться моделью инфокоммуникационной системы, которая была предложена МСЭ в рекомендациях серии Y.100. Она приведена на пятом рисунке. Над каждым элементом системы указано его название на русском языке. Те же названия на английском языке, используемые МСЭ, помещены снизу. Термин "Базовая сеть" был введен МСЭ недавно. Ранее этот элемент инфокоммуникационной системы назывался транспортной (Transport Network) или транзитной (Transit Network) сетью.

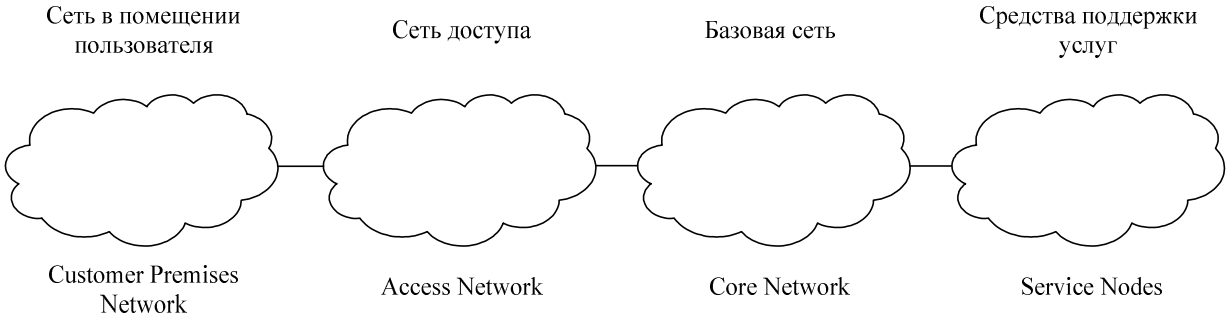


Рисунок П8.5. Модель инфокоммуникационной системы, предложенная МСЭ

Услуги, предоставляемые или поддерживаемые инфокоммуникационной системой, принято описывать с помощью атрибутов. Термин "атрибут" стал активно использоваться МСЭ при разработке рекомендаций по цифровой сети интегрального обслуживания. В отличие от технических характеристик, привычных для многих специалистов, атрибут может содержать вербальные утверждения.

Из перечня атрибутов любой инфокоммуникационной услуги для сети доступа существенно подмножество, которое определяет пропускную способность, параметры тракта для обмена информацией, надежность и ряд других характеристик. Логика услуги важна для базовой сети и сети в помещении пользователей. Информация, относящаяся к логике услуги, сетью доступа не обрабатывается, что следует из базовых положений, которые сформулированы в рекомендации МСЭ G.902 [25].

Это свойство сети доступа можно рассматривать как своего рода "прозрачность" к процессам, специфицированным для верхних уровней модели взаимодействия открытых систем. Поэтому все изменения версий программного обеспечения, необходимые для расширения функциональных возможностей коммутационного оборудования, не будут приводить к росту стоимости сети доступа. Данное утверждение справедливо и для новых версий программного обеспечения в оборудовании, расположенном в левой части модели инфокоммуникационной системой (сети в помещении пользователя).

Такое свойство сети доступа объясняет принятую Операторами зарубежных ТФОП практику установки цифровых АТС большой емкости [26]. Снижение общей численности коммутационных станций позволяет уменьшить расходы на замену версий программного обеспечения. Инвариантность сети доступа к логике поддерживаемых услуг, по всей видимости, сохранится и при переходе к ССП.

Для модернизации сетей доступа разработано множество новых технологий, но по очевидным экономическим соображениям многие Операторы ТФОП не спешат с заменой

двухпроводных физических цепей. Новые технологии доступа можно классифицировать разными способами. Один из таких способов – деление технологий на две группы. Первая группа включает технологии, которые (хотя бы частично) основаны на использовании двухпроводных физических цепей. Технологии второй группы такой возможности не предусматривают. Предлагаемая классификация новых технологий доступа показана на шестом рисунке.

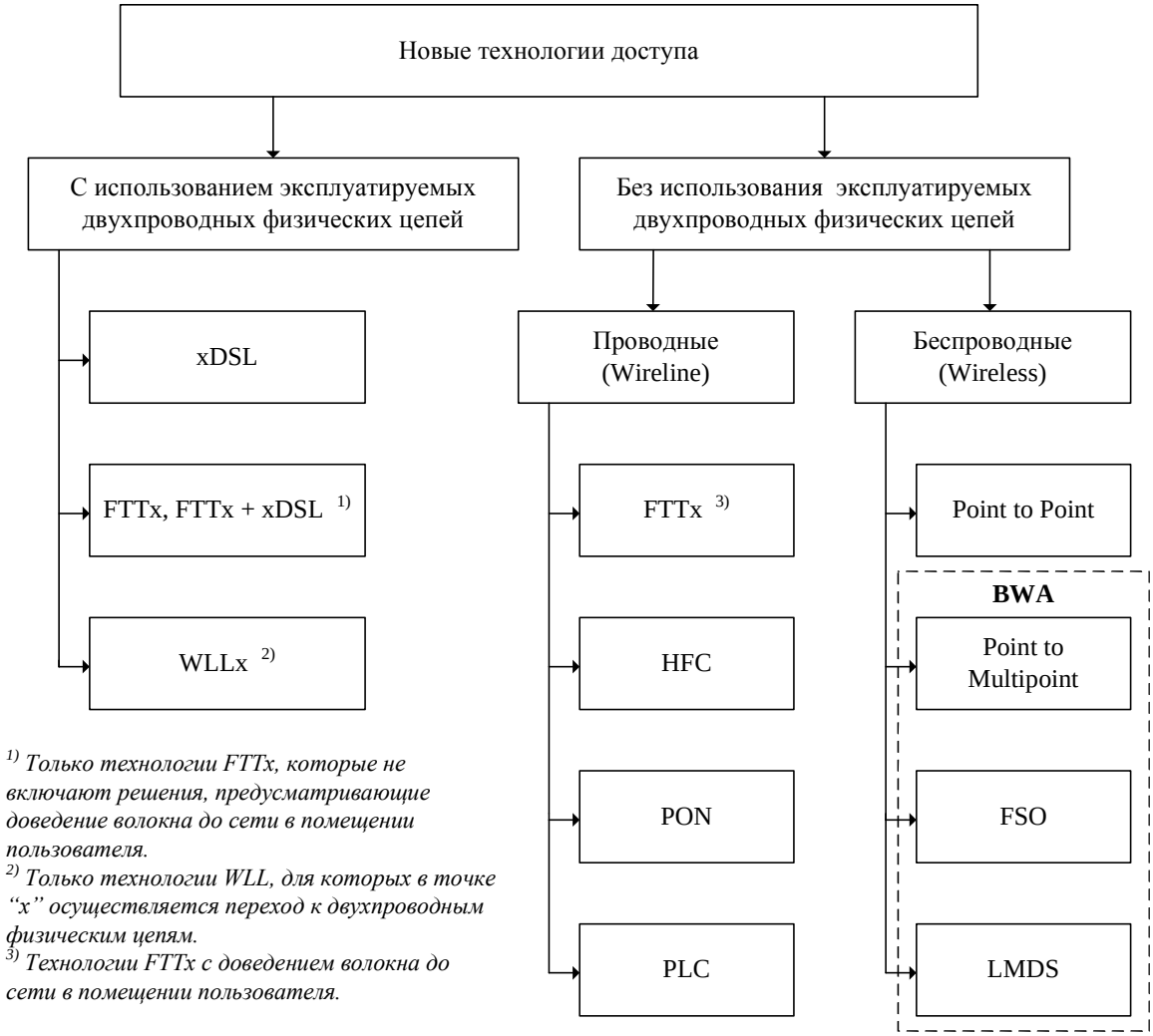


Рисунок П8.6. Классификация технологий доступа

Технологии, образующие первую группу, интересны, по крайней мере, с двух точек зрения. Во-первых, они обеспечивают поддержку ряда новых инфокоммуникационных услуг. Во-вторых, эти технологии позволяют снизить затраты на модернизацию сети доступа, даже если платежеспособный спрос на новые услуги отсутствует.

Вопросы практического использования технологий, входящих в семейство xDSL [27], активно обсуждаются в российской и в зарубежной технической литературе, а также на сайтах Internet. В настоящее время более популярны асимметричные цифровые тракты, создаваемые оборудованием ADSL, что объясняется основной областью применения рассматриваемого семейства технологий: доступ в Internet. Ожидается, что в перспективе будут более активно использоваться симметричные тракты, создаваемые, в частности, оборудованием типа SHDSL [28]. Типичный пример их применения – объединение разнесенных офисов одной компании в единую сеть. Для повышения скорости обмена информацией разработаны технологии ADSL2+, VDSL, VDSL2 и другие.

Технологии FTTx подразумевают прокладку кабеля с оптическим волокном до некоторой точки "x", после которой информация передается с использованием иной среды распространения сигналов. Для первой группы технологий интересны те решения FTTx,

для которых после точки "x" используется физическая двухпроводная цепь. Такой способ построения сети доступа может оказаться экономически выгодным, если в точке "x" устанавливается выносной концентратор цифровой коммутационной станции. Если некоторым пользователям необходим широкополосный доступ, то такая возможность может обеспечиваться сочетанием технологий FTTx и xDSL.

В некоторых случаях (чаще всего, в сельской местности) применяются технологии беспроводных абонентских линий (WLL) в сочетании с физическими цепями. Существует несколько разновидностей технологий WLL, которые различаются способом разделения каналов (частотный, временной и кодовый), а также иными характеристиками.

Технологии, входящие во вторую группу, в свою очередь, делятся на два вида: проводные (wireline) и беспроводные (wireless). Для технологий первого вида на рисунке П8.6 приведены четыре примера:

- подмножество FTTx, которое подразумевает прокладку кабеля с оптическими волокнами до сети, расположенной в помещении пользователя;
- комбинированная среда "волокно-коаксиал", известная по аббревиатуре HFC (способ, который был разработан и апробирован Операторами систем кабельного телевидения);
- пассивная оптическая сеть PON, обеспечивающая широкополосные услуги для нескольких групп потенциальных клиентов;
- технология PLC, которая использует линии электропитания в качестве среды передачи сигналов через сеть доступа.

Технологии второго вида также представлены четырьмя примерами. Три последних примера образуют общее подмножество технологий BWA, которое ориентировано на поддержку широкополосных услуг.

Оборудование, использующее конфигурацию связи "Point to Point", применяется для организации тракта между двумя приемопередатчиками. Первое поколение оборудования "Point to Point" предназначалось для включения телефонного аппарата в абонентский комплект коммутационной станции. Среди специалистов такое оборудование получило название "радиоудлинитель".

Конфигурация "Point to Multipoint" обеспечивает подключение терминалов или выносных модулей, расположенных в зоне обслуживания соответствующей базовой станции. Первые системы "Point to Multipoint" были предназначены исключительно для телефонной связи. Широкополосные услуги ими не поддерживались. В настоящее время в большинстве систем, использующих конфигурацию "Point to Multipoint", предусмотрена поддержка широкополосных услуг. Характерным примером такого решения считается оборудование, соответствующее семейству стандартов IEEE802.16. Оно более известно по аббревиатуре WiMAX [29].

Следующий пример технологий беспроводного широкополосного доступа – системы лазерной связи класса FSO. Удачно отражает смысл этой технологии название статьи [30]: "Fiber Optics Without Fiber" – волоконная оптика без волокна. Для передачи сигналов используется лазер, луч которого распространяется в открытом пространстве.

Завершает перечень примеров беспроводного доступа технология LMDS (LMCS). Эта технология изначально была предназначена для подачи телевизионных программ. Из поддерживаемых услуг следует выделить "Видео по заказу", которая в последние годы становится все популярнее. Функциональные возможности технологии LMDS позволяют обеспечить все виды связи, среди которых важная роль отводится высокоскоростному доступу в Internet.

Появление новых технологий не означает, что подключение телефонных аппаратов по двухпроводным физическим цепям не будет применяться Операторами связи. Для тех абонентов, которым необходимы только услуги телефонной связи, такой вариант вполне приемлем, если он экономически оправдан.

Термин "технология" был использован в этом разделе применительно к функциям по обмену информацией. Не менее интересны технологические аспекты, прямо или косвенно

связанные с системами передачи и коммутации. Реализация концепции ССП предполагает смену технологий коммутации. Это обстоятельство, в свою очередь, существенно влияет на выбор технологии передачи.

Большинство специалистов отдают предпочтение технологии Ethernet [31]. В ряде случаев оборудование Ethernet будет использовать цифровые тракты систем передачи синхронной иерархии (SDH). Образующаяся связка технологий получила название EoSDH (Ethernet over SDH). В новом поколении оборудования SDH предусмотрен порт Ethernet. Интерес к использованию сети SDH объясняется давно апробированными решениями, касающимися управления транспортными ресурсами и восстановления связи в случае отказов. Выбор технологии Ethernet обусловлен рядом причин, среди которых решающее значение связано с ожидаемым переходом к коммутации пакетов.

Анализ технологий передачи и коммутации не входит в перечень вопросов, которым посвящено данное Приложение к монографии. Читатель, при необходимости, без труда найдет литературу, в которой хорошо изложены соответствующие вопросы. Хорошие, на мой взгляд, статьи печатаются в отечественных научно-технических журналах, имеющих прямое или косвенное отношение к нашей отрасли.

Прочному научному объяснения встречаются
на каждом шагу разные помехи.
(Николай Рубакин)

П8.4. Структура сети доступа

Сети доступа, созданные Операторами ТФОП в городах, основаны на типовых решениях, которые предусматривают выделение зоны прямого питания и нескольких шкафных районов [2, 32]. Структуры сетей доступа в городах очень похожи. Для сельской местности характерно большее число типовых решений по построению сетей доступа вследствие географических и демографических различий.

Интеграция всегда была свойственна сетям доступа [32]. Она порождала изменение ряда базовых принципов, которые определяли построение сетей доступа. Переход к ССП стал катализатором этого процесса. Данное утверждение иллюстрирует рисунок П8.7, на котором изображена модель перспективной сети доступа. Основной элемент модели – МАК (мультисервисный абонентский концентратор), поддерживающий подключение всех видов терминального оборудования. Он также обеспечивает выход в базовую сеть. Аббревиатура FTTR (*R – remote*) используется для обозначения тех способов применения технологии FTTx, когда кабель с оптическими волокнами прокладывается от опорного коммутатора базовой сети к удаленному модулю. В данном случае функции удаленного модуля выполняет МАК. В зарубежной технической литературе такой концентратор часто называют MSAN – multi-service access node.

В верхней части модели показано включение обычного телефонного аппарата по двухпроводной физической цепи. Подобные решения будут вполне приемлемы для тех пользователей, которым необходима только телефонная связь.

Вариант (б) иллюстрирует одну из типичных ситуаций. Новая компания создает сеть в помещении пользователя на основе локальной сети (LAN), а кабельные сооружения для подключения к МАК пока отсутствуют. Тогда можно воспользоваться услугами другого Оператора. Для рассматриваемой модели показана возможность использования сети беспроводного широкополосного доступа стандарта WiMAX.

Некоторые компании стали использовать устройства интегрированного доступа (IAD), поддерживающие работу разных видов терминального оборудования. Для варианта (в) показано подключение телефонных аппаратов и локальной сети, которая обеспечивает связь для персональных компьютеров. Связь IAD с концентратором осуществляется за счет оборудования xDSL, которое работает по физической цепи. Ряд стандартов позволяет улучшить характеристики качества передаваемой информации за счет использования нескольких двухпроводных физических цепей.

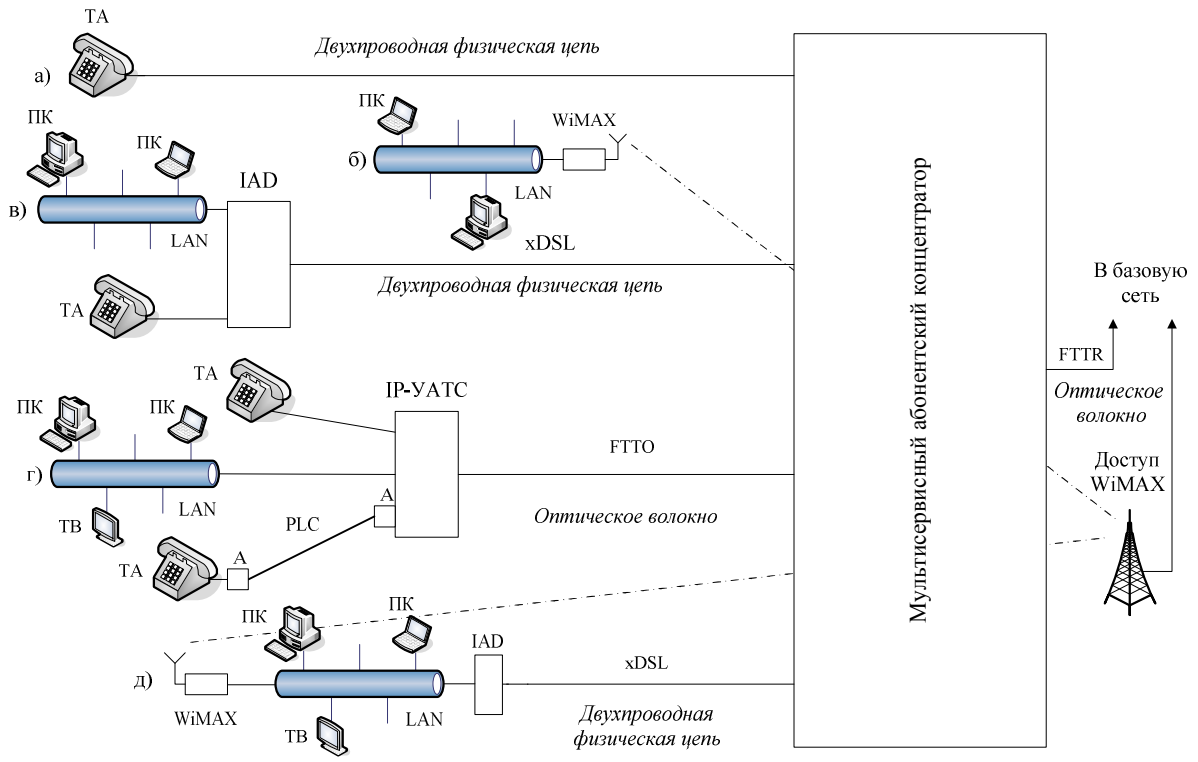


Рисунок П8.7. Модель перспективной сети доступа

Вариант (г) основан на использовании учрежденческой АТС, которая базируется на IP технологии (IP-УАТС). Телефонные аппараты в эту IP-УАТС подключаются двумя способами:

- по обычной двухпроводной физической цепи;
- через адаптеры (А), которые позволяют передавать информацию по линиям электропроводки (технология PLC).

В локальной сети показано устройство обмена телевизионными сигналами (ТВ). До концентратора предусмотрено использование кабеля с оптическим волокном. Буква "О" (Office) в аббревиатуре FTTO указывает на тот факт, что кабель с оптическим волокном проложен до офиса, то есть до границы с сетью в помещении пользователя.

В нижней части модели показано решение, которое можно считать комбинацией вариантов (б) и (в). Всем пользователям обеспечивается два независимых пути обмена информацией с базовой сетью:

- по цифровому тракту, образованному оборудованием xDSL, и далее через МАК;
- по цифровому тракту, созданному системой беспроводного широкополосного доступа, и далее через базовую станцию WiMAX.

Такое решение было предложено в [33] для обеспечения высокой надежности связи тем пользователям, которые готовы заключить с Оператором соглашение об уровне обслуживания (SLA). Эти соглашения предусматривают повышение тарифов за услуги, но гарантируют пользователям более высокие показатели качества обслуживания, нарушение которых Оператором оценивается заранее оговоренными денежными компенсациями.

Симбиоз проводных (wireline) и беспроводных (wireless) технологий, который для краткости можно назвать "W+W", позволяет повысить надежность связи. Это решение подчеркивает эффективность взаимного дополнения двух разновидностей доступа. Чаще проводные и беспроводные технологии рассматриваются как конкурирующие решения.

Модель сети доступа, показанная на рисунке П8.7, позволяет рассматривать разные варианты подключения терминального оборудования в концентратор. Для иллюстрации различных структур, позволяющих реализовывать сети доступа, лучше использовать дру-

гие модели. Они обычно состоят из двух плоскостей. В нижней плоскости обычно изображаются принципы организации транспортных ресурсов. Верхняя плоскость содержит схему связи между центром сети доступа, функции которого в ТФОП выполняет АТС, и выносными концентраторами.

На рисунке П8.8 показана модель сети доступа для цифровой МС, в которую надо включить 17 концентраторов. Транспортные ресурсы формируются за счет построения четырех колец. Они пронумерованы римскими цифрами. Каждое кольцо объединяет несколько мультиплексоров МВК. Семнадцатый МВК не входит ни в одно из колец; такая ситуация может быть обусловлена рядом причин экономического и организационного порядка. Каждый МВК расположен на одной площадке с выносным концентратором (К). Их номера в обеих плоскостях модели совпадают. Оборудование СУ находится в одном здании с МС.

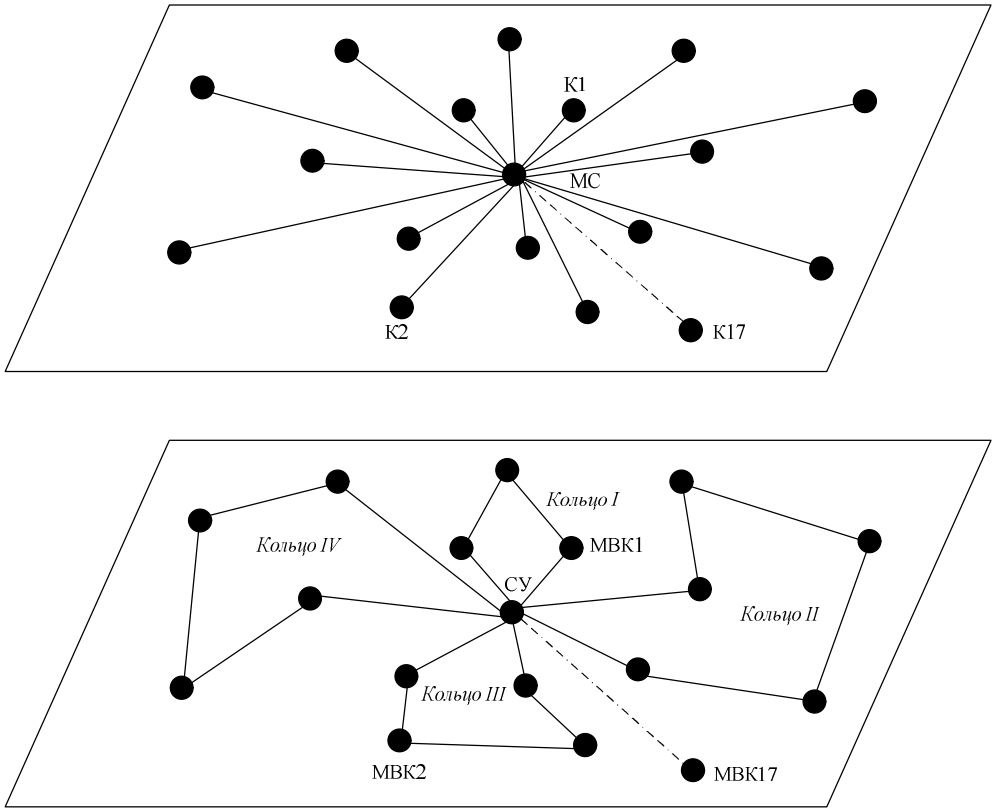


Рисунок П8.8. Модель сети доступа с четырьмя кольцами для создания транспортных ресурсов

За счет полупостоянных соединений в коммутационных матрицах МВК могут быть сформированы различные структуры для связи МС с концентраторами [7]. Обычно реализуется топология "звезда" [2, 7], которая показана в верхней плоскости рисунка П8.8. Между каждым концентратором (кроме семнадцатого) и МС существуют два пути обмена информацией, которые независимы с точки зрения теории надежности. На рисунке П8.9 эти пути обозначены буквами "a" и "b".

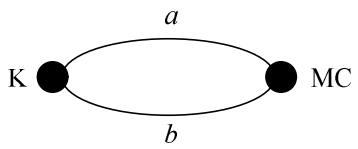


Рисунок П8.9. Связь МС с концентратором

Для первого концентратора, расположенного на одной площадке с МВК1, путь "a" не содержит транзитных участков в транспортной сети (полупостоянных соединений в

коммутационных матрицах других МВК). Путь "b" проходит через два транзитных МВК. Для второго концентратора оба пути к АТС содержат транзитные МВК – один и два соответственно. Самая низкая надежность связи с МС свойственна концентратору под семнадцатым номером (соответствующее направление показано штрихпунктирной линией в обеих плоскостях).

На рисунке П8.10 представлена другая двухплоскостная модель сети доступа, в которой транспортные ресурсы образуются за счет организации двух колец – внутреннего и внешнего. Предполагается, что семнадцатый МВК, как и в предыдущей модели, не входит ни в одно из колец. Связь СУ с каждым из колец показана пунктирными линиями. Таких связей может быть две (как показано в нижней плоскости предложенной модели) или более, что определяется требуемой надежностью связи между концентраторами и опорной АТС.

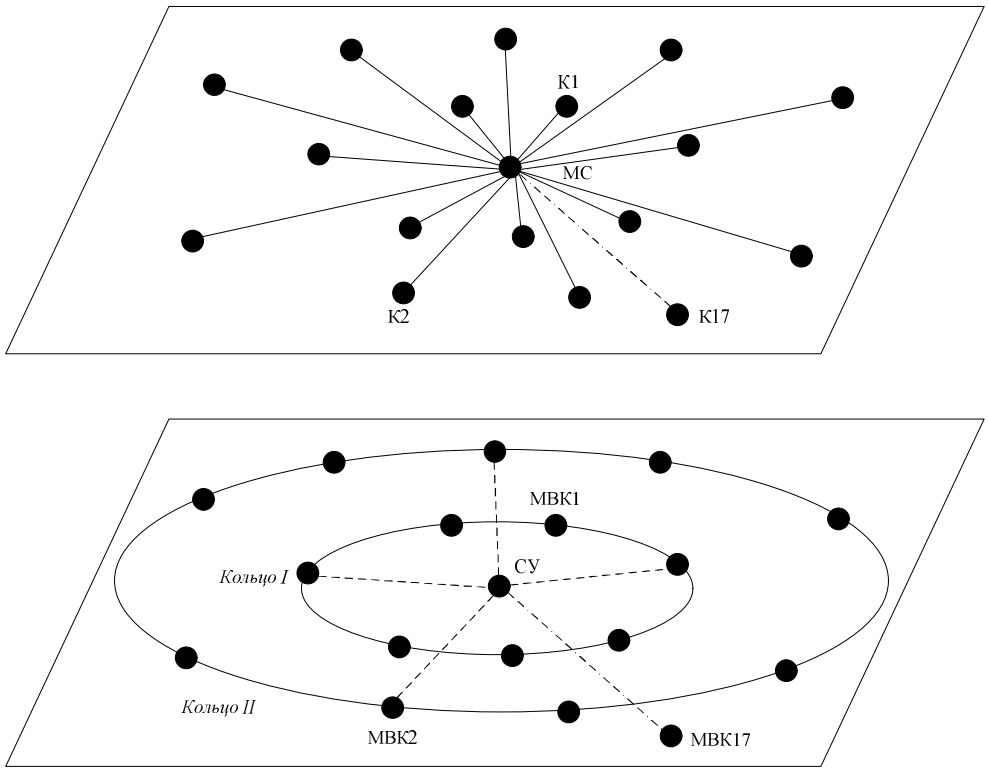


Рисунок П8.10. Модель сети доступа с внутренним и внешним кольцами для создания транспортных ресурсов

Граф с двумя вершинами и двумя ребрами, показанный на рисунке П8.9, можно считать универсальной моделью для оценки надежности связи между концентратором и АТС. Выделение независимых путей "a" и "b" для модели сети доступа с внутренним и внешним кольцами осуществляется аналогично. Отличие заключается в численности транзитных МВК. В модели с внутренним и внешним кольцами численность транзитных МВК может быть весьма существенной, что в ряде случаев требует дополнительных связей для обеспечения заданной надежности сети доступа.

Обе модели сети доступа, представленные на рисунках П8.8 и П8.10, инвариантны к технологиям передачи и коммутации. Правда, оптимальная структура сети доступа для разных технологий передачи и коммутации может содержать неодинаковое количество выносных концентраторов. Данное утверждение основано на анализе ряда материалов зарубежных Операторов связи о развитии своих сетей. Пример, касающийся, правда, сети более высокого уровня иерархии, можно найти в третьей главе монографии. Следует подчеркнуть, что изменение оптимального количества узлов коммутации определяется не иерархическим уровнем сети, а результатом решения оптимизационной задачи.

Сети доступа, созданные в ГТС, имеют различия, которые определяются многими факторами. Среди этих факторов заметную роль играют градостроительные принципы, численность обслуживаемых абонентов и проектные решения, принятые ранее. Тем не менее, сети доступа, эксплуатируемые в российских городах, имеют много общего.

Для СТС подобное утверждение трансформируется следующим образом: можно выделить совокупность типичных схем построения сетей доступа. На рисунке П8.11 показаны четыре варианта распределения потенциальных абонентов СТС, которых надо подключить к ОС. Предполагается, что для всех рассматриваемых вариантов границы территории пристанционного участка идентичны.

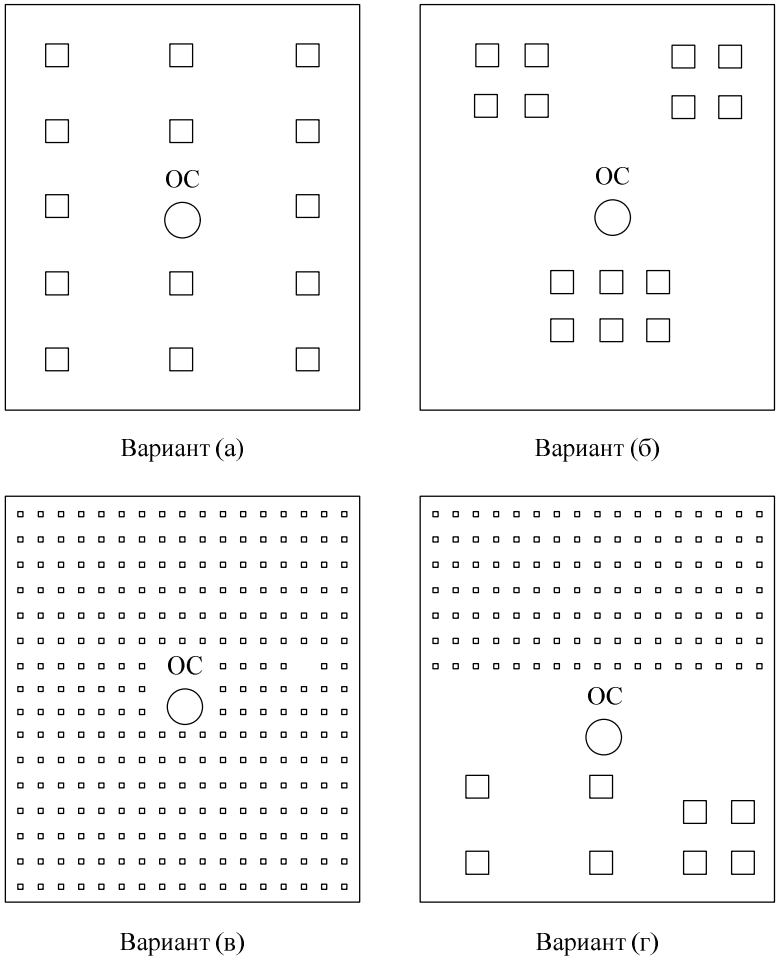


Рисунок П8.11. Четыре варианта распределения потенциальных абонентов

Варианты (а) и (б) часто встречается в тех субъектах Федерации, где доминируют сравнительно крупные населенные пункты. Распределение этих населенных пунктов по территории пристанционного участка для вариантов (а) и (б) различно. Как правило, для пристанционного участка, модель которого соответствует варианту (б), затраты на сеть доступа ниже.

Вариант (в) характерен для сельских районов с преобладанием малонаселенных пунктов. Их телефонизация с использованием проводных средств связи требует весьма существенных затрат. Очевидно, что для варианта (в) большой интерес представляют различные сценарии применения технологий беспроводного доступа.

Часто в границах одного пристанционного участка можно встретить все три вида распределений потенциальных абонентов, рассмотренных выше. Вариант (г) – типичный пример именно такой ситуации. Разработка оптимальных решений по построению сетей доступа для варианта (г) представляет собой самую сложную задачу.

Сложность проектирования сетей доступа для СТС заключается еще и в том, что предлагаемые решения плохо "масштабируются". Оптимальные проектные решения для

идентичных распределений потенциальных абонентов, различающихся только площадью (даже не формой) пристанционного участка, зачастую не совпадают.

Изучение влияния географических факторов представляется весьма продуктивным, так как затраты на сеть доступа в сельской местности очень существенны. Это можно проиллюстрировать с помощью двух кривых, приведенных на рисунке П8.12. Эти кривые позволяют оценить область эффективного применения различных систем доступа в зависимости от поверхностной плотности размещения абонентов – σ. Результаты были получены специалистами из университета штата Кентукки в процессе проведения исследований по программе развития сельской связи [34].

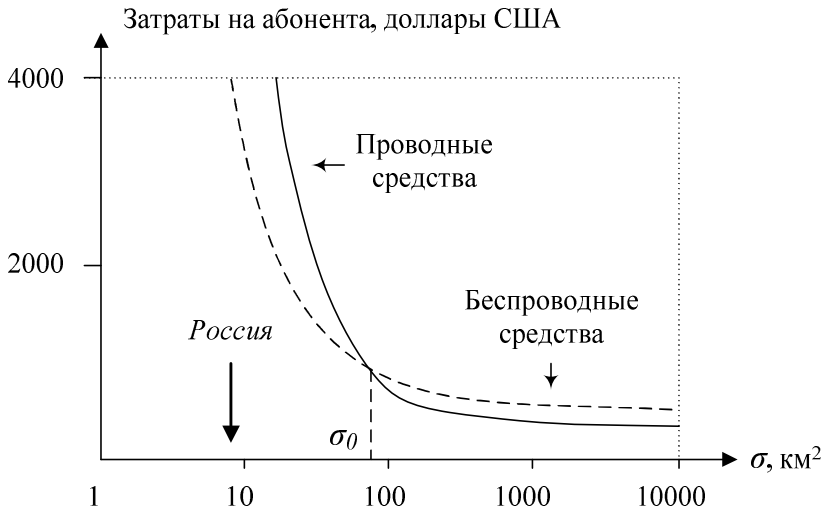


Рисунок П8.12. Влияние поверхностной плотности распределения потенциальных абонентов на стоимость сети доступа

Поверхностная плотность населения в России составляет, в среднем, 8,6 человека на один квадратный километр. Более того, ни в одном Федеральном округе эта величина не превосходит значение σ_0, свыше которого средства проводной связи становятся более эффективными с точки зрения удельных затрат на подключение абонента.

Ход обеих кривых в области очень низких значений поверхностной плотности размещения потенциальных абонентов свидетельствует, что для отдаленных пунктов в сельской местности стоимость сети доступа достигает огромных величин. В отчете МСЭ [35] приведены результаты изучения различных аспектов организации связи в отдаленных пунктах. Эффективными решениями в [35] были названы беспроводные IP технологии. Заметная роль отводится и системам спутниковой связи.

Перечень актуальных задач, прямо или косвенно относящихся к тематике "Сети доступа", обширен. Большинство из этих задач – применительно к новым тенденциям развития инфокоммуникационной системы – следует отнести к еще нерешенным.

Подавляющее большинство великих открытий,
смелых гипотез и важных наблюдений делается
в итоге длительной и сложной подготовки.
(А.И. Ракитов)

П8.5. Дальнейшая эволюция сетей доступа

Среди процессов модернизации сети доступа все более отчетливо проявляются тенденции, которые не так давно не рассматривались специалистами как серьезные направления развития инфокоммуникационной системы. Иногда подобные процессы выходят за

те границы, которые были определены для сети доступа моделью МСЭ, приведенной на рисунке П8.5.

Пожалуй, один из самых интересных процессов модернизации сети доступа связан с установкой нескольких выносных модулей, полностью заменяющих оборудование МС [36]. Тогда здание, в котором размещалось коммутационное оборудование, может быть продано. В [36] приводятся интересные данные, касающиеся возможного экономического эффекта. В частности, голландская компания KPN при затратах на проект модернизации своей сети в 0,9 млрд. евро смогла выручить от продажи освободившихся зданий АТС один млрд. евро!

Другой интересный процесс развития сети доступа заключается в применении высотных платформ [37, 38]. В англоязычной технической литературе они известны по аббревиатуре HAP (*High-Altitude Platform*). Высотные платформы обычно располагаются на высоте от 17 до 22 км. Правда, МСЭ определил несколько иной диапазон – от 20 до 50 км. В США и в Японии хорошо развиты спутниковые, кабельные и радиорелейные линии, а также различные виды систем беспроводного доступа. Тем не менее, использование высотных платформ началось именно в этих странах. Связь осуществляется в диапазоне 47 – 48 ГГц. Основная область применения подобных систем связи – доступ в Internet. С высоты 20 км связь обеспечивается в соте с радиусом примерно 35 км. Коэффициент ошибок по битам составляет вполне приемлемую величину – 10^{-6}. Коэффициент готовности пока еще уступает аналогичному показателю, свойственному другим видам доступа. Он оценивается на уровне 10^{-3} [38].

Операторы электросвязи с большим интересом следят за технико-экономическими оценками, касающимися эффективности применения кабелей с ОВ в сетях доступа. Этот важный вопрос целесообразно рассматривать с нескольких точек зрения.

Во-первых, реализация доступа класса FTTH становится соизмерима по затратам с вариантами решения FTTx+VDSL [39, 40, 41]. Причем стоимость сетей доступа, которые основаны на применении кабелей с ОВ, постоянно снижается. Ряд эксплуатационных компаний считает, что экономически выгодной становится установка в сетях доступа систем спектрального уплотнения. По крайней мере, дальнейшее развитие сетей доступа только за счет технологий xDSL большинством Операторов связи не считается разумным решением.

Во-вторых, актуальной проблемой становится эффективное использование кабелей с ОВ. В частности, по данным компании Insight Research в 24 крупнейших городах США используется 3 – 4 % проложенных кабелей с ОВ [42]. Существует такая же опасность с сетью доступа.

В-третьих, от шкафа до помещения пользователя стали использоваться кабели с полиэфирным ОВ. Эти кабели проще прокладывать в пределах здания. Полиэфирное волокно изготавливается с диаметром 0,5 – 1,0 мм. Ему свойственно большое затухание, но при протяженности линии несколько сотен метров обеспечивается скорость передачи порядка 100 Мбит/с. Минимум затухания в полиэфирных волокон приходится на длины волн 520 нм и 650 нм. Стоимость трансиверов достигла уровня 2 – 4 евро [43].

В-четвертых, наблюдается очень интересная тенденция развития оптических сетей доступа с точки зрения участников этого рынка. Например, в Европе только 8% сетей доступа на кабелях с ОВ построено Операторами ТФОП. Остальные 92% оптических сетей доступа принадлежат альтернативным Операторам, энергетическим компаниям и муниципалитетам [43]. Эти статистические данные относятся к 2005 году.

Представляется перспективным подход, названный в [44] *концепцией 2Э*. Речь идет об эффективном совместном использовании технических средств двух крупных систем: электроэнергетики и электросвязи. Реализация предложений, сформулированных в [44], может принести ощутимый синергетический эффект.

Последний из процессов, на который следует обратить внимание, заключается в приложениях перспективных сетей доступа к решению задач, которые напрямую не относятся к электросвязи [45]. Эти приложения включают аспекты телемедицины и экологиче-

ской безопасности (стандарты ISO серии 14000). Широкополосный доступ обеспечивает полноценную реализацию концепции "Work at home" – работа дома [46]. Такая организация труда позволяет сократить количество дней, когда сотрудникам компании необходимо приезжать в офис. Снижение частоты поездок обеспечивает, в свою очередь, уменьшение выброса углекислого газа в атмосферу. Кроме того, возможность работать дома позволит многим пожилым людям продолжать активно трудиться. По всей видимости, широкополосный доступ станет важным средством в улучшении условий жизни для людей с ограниченными возможностями. Еще один важный аспект применения широкополосных сетей доступа – обеспечение систем видеонаблюдения различного рода необходимыми транспортными ресурсами.

Завершить это Приложение мне бы хотелось интересными сообщениями, которые появились в Internet марте 2010 года. Широкополосный доступ во всемирную паутину стал столь важным фактором в жизни современного общества, что в Европейском Союзе и в США соответствующую возможность предлагают включить в состав так называемого "универсального обслуживания" – Universal Service. В тексте Федерального закона "О связи" используется другой термин – "Универсальная услуга". Судя по смыслу этого термина [47], более точным переводом следует считать "одинаковое обслуживание" [7]. Прилагательное "одинаковое", которое можно также заменить словами "всеобщее" или "всеобъемлющее", подчеркивает, что в любом сельском населенном пункте обеспечение неким базовым набором услуг должно быть идентично тому, которое доступно в городах. Ранее под универсальным обслуживанием, в основном, подразумевалась возможность доступа к ТФОП – хотя бы при помощи таксофона. В ближайшее время широкополосный доступ, вероятно, станет считаться столь же неотъемлемым атрибутом универсального обслуживания.

Литература к Приложению 8

1. Е.В. Мархай. Основы технико-экономического проектирования городских телефонных сетей. – М.: Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио, 1953.
2. И.М. Жданов, Е.И. Кучерявый. Построение городских телефонных сетей. – М.: Связь, 1972.
3. От мастерских до акционерного общества. АО "Лентелефонстрой". – СПб.: Концерн "Связьстрой", 1994.
4. Развитие связи в СССР. Под редакцией Н.Д. Псурцева. – М.: Связь, 1967.
5. CCITT manual "Local Network Planning". – ITU, Geneva, 1979.
6. ITU-TS. Introduction of New Technologies in Local Networks. – Geneva, 1993.
7. Н.А. Соколов. Телекоммуникационные сети. – М.: Альварес Паблишинг, 2003.
8. Б.С. Гольдштейн. Системы коммутации. – СПб.: БХВ, 2003.
9. А.В. Пинчук, Н.А. Соколов. Мультисервисные абонентские концентраторы для функциональных возможностей "Triple-Play Services". – Вестник связи, 2005, №6.
10. Л.Е. Варакин. Введение к книге "Связь России в XXI веке". – М.: Международная Академия Связи, 1999.
11. Л.Е. Варакин, Н.А. Соколов. Универсальная Персональная Связь. – Электросвязь, № 7, 1993.
12. M. Crawford, D. Verheye. Residential Service Aggregation in the Second Mile. – Alcatel Telecommunications Review, 2nd Quarter 2003.
13. L.K. Vanston, R.L. Hodges. Technology forecasting for telecommunications. – Telektronikk, Volume 100, No. 4, 2004.
14. В.В. Афанасьев, Ю.М. Горностаев. Эволюция мобильных сетей. – М.: "Связь и бизнес", 2001.
15. Л. Даанс, В. Масколо, М. Фонтана. Конвергентные транспортные сети. – Технологии и средства связи, №1, 2005.

16. ISO Standards Compendium "ISO 9000 Quality Management, Sixth Edition", 1996.
17. B. Karlson, A. Bria, J. Lind, P. Lönnqvist, C. Norlin. Wireless Foresighf. – Wiley, England, 2003.
18. Н.А. Соколов. Процессы конвергенции, интеграции и консолидации в современной телекоммуникационной системе. – Connect! Мир связи, 2007, №10.
19. M. Haidar. Wireless Local Loop and the Techno-Economic Considerations in its Implementation. – INTER COMM ® 97. Congress Proceedings.
20. G. Yilmaz, G. Durusoy. Studies on Application Possibility of Local Telephone Cables for 2 Mbit/s ISDN Transmission. – ITC'96 Conference Record, Vol. 1, Istanbul-Türkiye, April 1996.
21. С.А. Дмитриева, Н.А. Соколов. Структурные характеристики сельских сетей. Сборник научных трудов ЦНИИС "Сети с интеграцией служб", 1990.
22. B. Hedfors. The future is now. – Proceedings "Global Communications Asia 2001".
23. B. Van Doorselaer, T. Coppens. Broadband Gaming: It Is a Serious Business. – Alcatel Telecommunications Review, 2st Quarter 2003.
24. D. W. Scott. Multivariate Density Estimation. Theory, Practice, and Visualization. – Wiley, 1992.
25. ITU-T. Framework Recommendation on functional access networks. Architecture and functions, access types, management and service node aspects. Recommendation G.902 – Geneva, 1995.
26. Перспективные телекоммуникационные технологии. Потенциальные возможности. Под редакцией Л.Д. Реймана, Л.Е. Варакина. – М.: МАС, 2001.
27. В. Горальски. ADSL. – М.: издательство "Лори", 2007.
28. В.В. Угрюмов, С.Б. Сметанин. Новейшая технология передачи данных и телефонии по одной медной паре. – Вестник связи, №6, 2003.
29. В. Столлингс. Беспроводные линии связи и сети.– М.: издательский дом "Вильямс", 2003.
30. H.A. Willebrand, B.S. Ghuman. Fiber Optics Without Fiber. – IEEE Spectrum, August 2001.
31. П. Нойман, В. Пискалар. Доступ по Ethernet на подходе. – Журнал сетевых решений LAN, февраль, 2005.
32. Н.А. Соколов. Сети абонентского доступа. Принципы построения. – Пермь, "Энтер-профи", 1999.
33. N. Sokolov, A. Alter. Broadband Wireless Access and Communications Reliability Provision. – Proceedings of the Moscow International Conference "Broadband Russia & CIS Summit", Moscow, 2004.
34. B.L. Egan. Improving Rural Telecommunications Infrastructure. – Paper prepared for TVA Rural Studies University of Kentucky.
35. ITU-D. New Technologies for Rural Applications. – Final Report of ITU-D Focus Group 7, 2000.
36. С.В. Журавлев. Опыт перехода сетей связи на пакетные технологии. – Вестник связи, №12, 2007.
37. В.М. Вишневский, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович «Широкополосные беспроводные сети передачи информации». — М.: Техносфера, 2005.
38. E. Falletti, M. Laddomata, M. Mondin, F. Sellone. Integrated Sevices from High-Altitude Platforms: A Flexible Communication System. – IEEE Communications Magazine, February, 2006.
39. M. Jensen, R.H. Nielsen and O.B. Madsen. Comparison of Cost for Different Coverage Scenarios between Copper and Fiber Access Network. – The 8th International Conference on Advanced Communication Technology, Phoenix Park, Korea, 2006, Proceedings, Vol. III.
40. С. Харди. Конференция FTTH показала прогресс в использовании технологии. – Lightwave, Russian Edition, No 1, 2007.

41. J. Barthold. U.S. telcos bet on video quality. – Telecommunications International, August 2007.
42. А.В. Голышко. За широкую полосу! – Вестник связи, №11, 2007.
43. А. Ночивелли. Полимерные волокна – универсальный оптический доступ. – Lightwave. Russian Edition, 2006, №3.
44. В. Комашинский, Н. Соколов. Концепция 2Э: новый подход к модернизации системы сельской связи. – Connect! Мир связи, №9, 2011.
45. K. Struthers-Watson. Green to go for fiber. – Telecommagazine, March 2008.
46. A. G. Canizares. 500 Solutions for Working at Home. – Universe, 2004.
47. B. Henderson. Ensuring Rural and Remote Telecommunications Access: Technology, Community and History. – Paper presented at First Roundtable of Emerging Markets Forum, Stanford University, 2000.