

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича"

На правах рукописи

Леваков Андрей Кимович

**МОДЕЛИ И ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЕТИ СВЯЗИ  
СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ**

Специальность 05.12.13 –  
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант:  
доктор технических наук,  
старший научный сотрудник  
Соколов Николай Александрович

Санкт-Петербург – 2018

## Оглавление

	Стр.
Введение.....	5
1. Анализ принципов модернизации телекоммуникационной системы .....	18
1.1 Ключевые аспекты развития телекоммуникационной системы.....	18
1.2 Особенности перехода к сети связи следующего поколения .....	23
1.2.1 Стратегии и сценарии перехода к NGN .....	23
1.2.2 Модель системы электросвязи в виде "черного ящика" .....	33
1.2.3 Классификация ЧС и возможных состояний NGN.....	39
1.3 Анализ положительных и отрицательных свойств NGN.....	45
1.4 Анализ работ, посвященных принципам функционирования сетей электросвязи в ЧС.....	50
1.5 Выводы по главе 1 .....	57
2. Характеристики надежности и живучести сети связи следующего поколения в чрезвычайных ситуациях.....	60
2.1 Математические модели и постановка решаемых задач .....	60
2.2 Выбор показателей надежности в условиях ЧС.....	68
2.3 Структурные характеристики NGN и возможности обеспечения надежности телекоммуникационной системы .....	72
2.4 Анализ типичных состояний телекоммуникационной системы при разрушающих воздействиях разного рода.....	95
2.5 Методика применения комплекса резервных технических средств .....	108
2.6 Дополнительные аспекты анализа надежности и живучести телекоммуникационной системы .....	114

2.7 Выводы по главе 2.....	115
3. Характеристики работы узла коммутации в составе сети связи следующего поколения при чрезвычайных ситуациях .....	118
3.1 Особенности работы узла коммутации при ЧС .....	118
3.2 Модели узла коммутации NGN .....	119
3.3 Исследование упрощенных моделей узла коммутации NGN .....	125
3.4 Исследование основных моделей узла коммутации NGN.....	130
3.4.1 Конкретизация моделей УК .....	130
3.4.2 Выбор параметров моделей УК .....	133
3.4.3 Результаты исследования моделей УК .....	139
3.5 Регулирование трафика в центре обслуживания вызовов Системы-112 .....	149
3.6 Характеристики потока IP-пакетов, на выходе узла коммутации .....	160
3.7 Выводы по главе 3.....	166
4. Характеристики качества функционирования сети связи следующего поколения при чрезвычайных ситуациях .....	169
4.1 Особенности работы сети связи следующего поколения в условиях ЧС .....	169
4.2 Модель маршрута обмена IP-пакетами при ЧС и ее анализ.....	178
4.3 Анализ поведения NGN при перегрузке одного узла коммутации .....	181
4.4 Методика оценки коэффициентов вариации $C_A(i)$ .....	189
4.5 Нормы на показатели качества обслуживания мультисервисного трафика при ЧС .....	197
4.6 Выводы по главе 4.....	206
5. Рекомендации по организации работы телекоммуникационной системы при возникновении чрезвычайных ситуаций .....	210

5.1 Особенности сосуществования канальных и пакетных технологий .....	210
5.2 Использование косвенных методов ограничения трафика.....	216
5.3 Алгоритмы функционирования узлов коммутации при чрезвычайных ситуациях.....	226
5.3.1 Алгоритм ограничения трафика .....	226
5.3.2 Алгоритм изменения атрибутов трафика .....	229
5.4 Алгоритм анализа связности после наступления разрушающих воздействий .....	236
5.5 Результаты исследования с позиций системного анализа .....	242
5.6 Оценка народно-хозяйственного эффекта от использования результатов проведенных исследований.....	244
5.7 Возможные направления дальнейших исследований .....	249
5.8 Выводы по главе 5.....	251
Заключение .....	254
Список принятых сокращений.....	257
Список использованных источников .....	259
Приложение А .....	282
Акты о внедрении полученных результатов .....	282
Приложение Б .....	297
Результаты измерения трафика, типичного для ЧС .....	297
Приложение В.....	302
Результаты моделирования многолинейной СМО с паузами между попытками вызовов.....	302

## Введение

**Актуальность темы исследования.** Принципы модернизации сети связи общего пользования базируются на концепции NGN (Next Generation Network), разработанной Международным союзом электросвязи (МСЭ). В российской технической литературе эту концепцию называют сетью связи следующего (или последующего) поколения. При переходе к NGN необходимо решить ряд новых научных задач, среди которых следует выделить аспекты ее функционирования в чрезвычайных ситуациях (ЧС) – обстановки на определенной территории, сложившейся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей [159].

Сложность решения поставленной задачи обусловлена тремя основными факторами. Во-первых, пакетные технологии передачи и коммутации усложняют задачу поддержки установленных показателей качества обслуживания мультисервисного трафика, который, как показали результаты проведенных измерений, существенно меняет свои характеристики после возникновения ЧС. Во-вторых, некоторые виды ЧС могут приводить к отказам части элементов телекоммуникационной системы, что стимулирует разработку системных решений по повышению коэффициента готовности в сети связи следующего поколения. В-третьих, начался процесс внедрения так называемой Системы-112, которая предусматривает возможность вызова всех экстренных оперативных служб по единому, для всех стран Европы, трехзначному номеру "112" (его рекомендуют произносить, называя цифры отдельно: "1 – 1 – 2"), что требует дополнительного анализа с точки зрения устойчивого функционирования телекоммуникационной системы при возникновении ЧС.

Результаты, которые были получены отечественными и зарубежными специалистами в части принципов планирования и процессов функционирования NGN, очень важны для теории и практики. С другой стороны, функционирование NGN в ЧС имеет специфику, которая обусловлена природой происшествий. По этой причине необходима разработка научно обоснованных принципов функционирования сети связи следующего поколения, учитывающих и характер трафика в ЧС, и возможность отказов ее элементов. Эти принципы базируются на исследовании характеристик качества обслуживания трафика, надежности NGN и процессов функционирования Системы-112.

Аргументы, изложенные выше, определяют актуальность разработки принципов функционирования NGN в ЧС, то есть с момента ее возникновения вплоть до полной ликвидации отрицательных последствий.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследованию системных проблем построения NGN и методам поддержки нормированных показателей качества обслуживания мультисервисного трафика посвящены исследования российских ученых Вишневого В.М., Гольдштейна Б.С., Иванова А.Ю., Кучерявого А.Е., Назарова А.А., Назарова А.Н., Нетеса В.А., Парамонова А.И., Ромашковой О.Н., Рослякова А.В., Самуйлова К.Е., Соколова Н.А., Степанова С.Н., Сычева К.И., Шелухина О.И., Яновского Г.Г. и других специалистов. В работах Исаева В.И., Мамонтовой Н.П., Рослякова А.В. и других авторов представлены результаты исследований качества обслуживания трафика в центрах обработки вызовов, схожих по своим характеристикам с оборудованием, которое используется в составе Системы-112. Из зарубежных ученых необходимо отметить работы следующих авторов: Allen O., Gelenbe E., Kleinrock L., Kuhn P., Langenbach-Beltz M., Pujolle G.

Вопросы функционирования сетей класса NGN в условиях ЧС представлены в научно-технической литературе в меньшем объеме. Из отечественных публикаций следует выделить статью [174]. Среди зарубежных источников уместно обратить внимание на материалы из рубрики "Связь в чрезвычайных ситуациях",

размещаемые на сайте МСЭ. Правда, эти материалы, в основном, носят постановочный характер, что соответствует принципам работы МСЭ.

По этим причинам результаты всестороннего исследования принципов функционирования NGN в условиях ЧС еще не нашли должного отражения в научно-технической литературе. В диссертационной работе акцент сделан именно на комплексном подходе к изучению ключевых принципов работы пакетной сети, построенной по идеологии NGN, при различных последствиях, которые обусловлены влиянием ЧС.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования служит сеть NGN, работающая в условиях ЧС. Предмет исследования – комплекс моделей, формализующих процессы функционирования сети NGN в ЧС.

**Цели и задачи исследования.** Диссертация посвящена решению важной народно-хозяйственной задачи – разработке совокупности базовых принципов функционирования NGN в условиях действия ЧС с учетом требований ведомств, принимающих участие в ликвидации ее последствий, абонентов и Операторов связи. Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие основные задачи:

- исследование путей повышения устойчивости функционирования NGN в условиях действия ЧС;
- исследование способов обслуживания мультисервисного трафика, характерного для периода действия ЧС;
- исследование новых принципов доступа к экстренным оперативным службам (в частности, посредством Системы-112) с точки зрения решения перечисленных выше проблем;
- составление рекомендаций для Операторов связи, Разработчиков телекоммуникационного оборудования, и Поставщиков инфокоммуникационных услуг.

**Научная новизна диссертационной работы.** Новые результаты, полученные в ходе работы над диссертацией, заключаются в следующем:

1. Впервые сформулированы базовые положения модернизации системы электросвязи путем реализации концепции NGN с учетом требований, которые типичны для периода действия ЧС.
2. Разработана система новых, отличных от существующих, взаимосвязанных алгоритмов управления телекоммуникационной сетью. Они основаны на реконфигурации структуры (по заранее разработанным правилам или на основе оперативной информации о состоянии ресурсов передачи, коммутации и обработки информации), ограничении трафика и введении новой системы приоритетов для обработки IP-пакетов на период действия ЧС.
3. Предложен и обоснован комплекс новых математических моделей узла коммутации в сети следующего поколения и маршрута обмена IP-пакетами между интерфейсами пользователь-сеть в виде систем (СМО) и сетей (СеМО) массового обслуживания для исследования характеристик качества обслуживания мультисервисного трафика. Модели отличаются от известных тем, что учитывают условия функционирования сети, типичные для ЧС.
4. Получены неизвестные ранее аналитические соотношения для оценки качества обслуживания мультисервисного трафика в ЧС, позволившие уточнить ряд важных методов анализа сложных СМО и СеМО.
5. Уточнен метод расчета характеристик надежности для NGN при возникновении ЧС, учитывающий впервые предложенные процедуру оперативного введения дополнительных ресурсов передачи и коммутации с целью поддержки максимально достижимых показателей качества обслуживания мультисервисного трафика, а также введение в состав сети "Интеллектуальных шлюзов", выполняющих функции резервных контроллеров сети.
6. Выявлена важная особенность характера потоков IP-пакетов, представленных распределениями, заданными на ограниченном интервале времени. При идентичных значениях двух первых моментов такие потоки приво-



дят к более существенным задержкам IP-пакетов, чем потоки, для которых характерны распределения, заданные на интервале  $[0, \infty)$ .

7. Впервые сформулированы научно обоснованные принципы функционирования сети следующего поколения в ЧС, касающиеся полного жизненного цикла телекоммуникационной системы: формирование концепции модернизации сетей связи, разработка проектных решений, проведение строительного-монтажных работ, эксплуатация технических средств, а также восстановление сети, если оно требуется после ЧС.

#### **Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы.**

Теоретическая значимость результатов диссертационной работы заключается в выявлении проблем, касающихся структуры сети NGN в условиях ЧС, и решении задачи по обеспечении надежности связи, в обнаружении и описании закономерностей, присущих трафику в условиях ЧС, в получении ряда новых аналитических соотношений, существенных для прикладной теории телетрафика.

Наиболее важные практические результаты представлены тремя апробированными рекомендациями: принципы функционирования сети связи следующего поколения с момента возникновения ЧС до ликвидации их последствий, организация обслуживания лавинообразного потока вызовов при возникновении масштабных ЧС, предложения по применению Интеллектуальных шлюзов для повышения надежности и живучести телекоммуникационной системы.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы системного анализа, теорий вероятностей, телетрафика, графов, принятия решений, управления запасами, экспертных оценок, а также имитационное моделирование.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы использованы:

- в ЛО ЦНИИС при проведении исследований по построению сетей NGN в части обеспечения их работы в нештатных ситуациях;

- в Макрорегиональном филиале "Центр" ОАО "Ростелеком" при принятии проектных решений по построению сетей NGN в части обеспечения их работы в чрезвычайных ситуациях;
- в 13 Исследовательской комиссии сектора стандартизации МСЭ при разработке вклада "Механизм ограничения трафика в чрезвычайных ситуациях";
- в Главном управлении МЧС России по Курской области при создании Системы-112 Курской области, принятой государственной комиссией в промышленную эксплуатацию в 2013 году;
- в проектном институте "Гипросвязь" при разработке схем развития сетей связи в ряде субъектов Российской Федерации;
- в научно-техническом центре "Протей" при проведении разработки Интеллектуального шлюза и центра обработки вызовов для Системы-112;
- в компании-производителе оборудования связи "Искрател" (Словения) при разработке и внедрении оборудования SI3000 eCIS для использования в ЦОВ Системы-112, а также новой версии оборудования SI3000 CS, где был внедрен механизм снижения количества вызовов в условиях ЧС;
- в учебном процессе кафедры "Инфокоммуникационных систем" СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

Сведения об использовании результатов диссертации подтверждаются актами внедрения. Они приведены в Приложении А к диссертации.

**Степень достоверности и апробация результатов исследования.** Достоверность результатов проведенных исследований подтверждается корректным применением математического аппарата, имитационным моделированием, натурными экспериментами, широким спектром публикаций в рецензируемых научных журналах. Основные положения диссертационной работы были представлены и обсуждались на 6-й ежегодной международной конференции "NGN в России. Технологии и услуги" (Санкт-Петербург, 2007 год), 8-ой международной конференции "Управление сетями электросвязи" (Москва, 2012 год), I-ой II-ой, III-ей и V-ой международных научно-технических и научно-методических конференциях

"Актуальные проблемы инфокоммуникаций в науке и образовании" (Санкт-Петербург, 2012, 2013, 2014 и 2016 годы соответственно), 12-ой международной конференции "Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networking" (Санкт-Петербург, 2013 год), Международном семинаре МСЭ "Co-evolution of Info communication Technologies and Society, or Ways to the Society without Frontiers" (Санкт-Петербург, 2013 год), заседаниях кафедры инфокоммуникационных систем СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы изложены в 44 опубликованных работах, в том числе в одной монографии. 31 работа напечатаны в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанные в диссертации принципы управления ресурсами позволяют учесть особенности функционирования сети связи следующего поколения при различных последствиях ЧС, приводящих к отказам оборудования и трактов обмена информацией, а также к изменению характера мультисервисного трафика, что обеспечивает адаптацию сети связи к работе в условиях ЧС без снижения её эффективности при работе в штатном режиме.
2. Предложенные математические модели узлов коммутации и маршрутов обмена IP-пакетами между интерфейсами пользователь-сеть, учитывающие особенности работы всех элементов в составе сети следующего поколения в условиях ЧС, обеспечивают получение требуемых оценок основных характеристик качества обслуживания мультисервисного трафика.
3. Результаты исследования СМО и СеМО, служащих адекватными моделями средств передачи и коммутации IP-пакетов в сети следующего поколения, позволяют оценить характеристики, которые определяют уровень качества обслуживания мультисервисного трафика в условиях ЧС.

4. Нормативные показатели надежности и живучести сети связи следующего поколения достигаются за счет установки Интеллектуальных шлюзов. Это оборудование обеспечивает сохранение автономной работы всех важнейших элементов телекоммуникационной системы в условиях ЧС, включая доступ к экстренным оперативным службам, при потере связности с контроллерами медиашлюзов, расположенными вне территории муниципальных образований.
5. Показано, что в течение ЧС наблюдаются периоды времени, когда формируются потоки IP-пакетов с распределениями, заданными на ограниченном интервале времени. Они приводят к более существенным задержкам процесса обмена информацией, чем потоки IP-пакетов, которые представимы распределениями, заданными на интервале  $[0, \infty)$ , при условии, что значения двух первых моментов для обоих типов потоков совпадают.
6. Предложенный алгоритм снижения количества вызовов в узлах коммутации при возникновении ЧС, основанный на ограничении длительности разговора с уведомлением вызывающего абонента и введении паузы между попытками вызовов, величина которой варьируется в зависимости от загрузки сети при помощи метода "деление отрезка пополам", обеспечивают повышение доли обслуженного трафика.
7. Сформулированные принципы и основанные на них рекомендации по планированию сетей связи следующего поколения, строительству и эксплуатации технических средств, учитывающие специфику работы телекоммуникационной системы в ЧС, обеспечивают решение важной народно-хозяйственной задачи – сохранения жизни и здоровья граждан, а также обеспечения устойчивой работы народно-хозяйственных объектов.

Положения под номерами 4, 5, 6 и 7 представляют собой базовые принципы функционирования NGN в условиях ЧС, разработанные в процессе проведения диссертационного исследования.

**Личный вклад.** Результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. В работах, которые опубликованы с соавторами, соискателю, как правило, принадлежит основная роль в постановке и решении задач, а также при обобщении полученных результатов. В статьях [118, 119, 128] соискатель поставил задачу и участвовал в трактовке полученных результатов. Практические решения и рекомендации разработаны при его непосредственном участии или под его научным руководством.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Общий объем диссертации – 305 страниц, включая 131 формулу, 84 рисунка, 11 таблиц, список литературы из 259 наименований.

#### **Содержание диссертационной работы:**

**В первой главе** диссертационной работы представлены результаты анализа процесса модернизации телекоммуникационной системы. Этот анализ выполнен с точки зрения функционирования телекоммуникационной системы в ЧС. Важнейшим процессом эволюции телекоммуникационной системы стал переход к NGN. Следует отметить, что в данной диссертационной работе под NGN понимаются также и последующие концепции модернизации телекоммуникационной системы, основанные на использовании централизованных устройств управления соединениями (например, программных коммутаторов).

Подобные направления развития электросвязи, как большинство проявлений научно-технического прогресса, имеют положительные и отрицательные стороны. По этой причине необходимо исследовать влияние различных стратегий и сценариев перехода к NGN с точки зрения того периода ее функционирования, который приходится на период действия ЧС. Именно этому направлению исследований посвящена значительная часть первой главы диссертационной работы.

Важным вопросом следует считать классификацию ЧС и возможных состояний NGN, обусловленных возникающими последствиями. Разработанная классификация дополняет известные положения для ЧС, но направлена на исследуемый объект – телекоммуникационную систему, эволюционирующую в направле-

нии NGN. Завершается первая глава диссертационной работы анализом публикаций, посвященных принципам функционирования сетей электросвязи в ЧС. В результате формируется совокупность задач, требующих решения. Эти задачи рассматриваются в следующих главах диссертационной работы.

**Во второй главе** диссертационной работы исследуются характеристики надежности и живучести NGN в период действия ЧС. Предложены математические модели NGN, актуальные для ЧС. Эти модели, в зависимости от решаемых задач, могут быть представлены обычными графами, вероятностными графами и гиперсетями. Для периода ЧС следует выбрать показатели надежности в виде ограниченного набора атрибутов. Это позволяет проводить контроль только самых важных свойств телекоммуникационной системы.

Исследование структурных характеристик – важный компонент комплексного процесса, представляющего собой анализ функционирования NGN в условиях ЧС. Основное внимание при исследовании структурных характеристик NGN обращено на практические модели, которые отличаются от теоретических конструкций в силу объективных и субъективных причин. Эти исследования позволяют провести анализ типичных состояний телекоммуникационной системы при возникновении разрушающих воздействий.

При некоторых разрушающих воздействиях единственным способом сохранения целостности NGN становится применение комплекса резервных технических средств. В одном из разделов второй главы изложены предложения по оценке объема этого комплекса. Важным средством сохранения (восстановления) целостности NGN является запас ресурсов электропитания, для расчета которого предложена инженерная методика.

**В третьей главе** диссертационной работы исследуются характеристики узла коммутации в составе NGN. Интерес к этим исследованиям обусловлен тем, что разрушающие воздействия вследствие ЧС возникают редко, а перегрузки узлов коммутации наблюдаются в большинстве нештатных ситуаций. Характеристики узлов коммутации в NGN определяются нормами на показатели качества обслуживания мультисервисного трафика, которые сформулированы в рекомен-

дациях МСЭ. Предметом исследования служат вероятностно-временные характеристики, для получения и анализа которых используются методы теории телетрафика.

Важным этапом исследования вероятностно-временных характеристик в узле коммутации становится выбор адекватной математической модели. В третьей главе диссертации разработана модель, весьма точно представляющая основные процессы обработки IP-пакетов. В этой модели входящий поток заявок (ими считаются IP-пакеты) далек от пуассоновского процесса, для которого известны аналитические соотношения. По этой причине важным инструментом исследования становится имитационное моделирование. Для выбранной модели получены все требуемые вероятностно-временные характеристики в виде приближенных соотношений, для которых приведена оценка возникающей погрешности вычислений.

Важным элементом телекоммуникационной системы в период ЧС становятся центры обслуживания вызовов, поступающих в экстренные оперативные службы. Трафик, обслуживаемый этими центрами, при возникновении ЧС заметно меняет свои характеристики. Для эффективного обслуживания поступающих вызовов предложен метод регулирования трафика. После его реализации был получен патент на полезную модель.

**В четвертой главе** диссертационной работы исследуются характеристики NGN в целом. Речь идет о вероятностно-временных характеристиках, аналогичных тем, которые рассматривались в предыдущей главе, но заданных на маршруте обмена IP-пакетами между терминальным оборудованием пользователей. Математической моделью служит многофазная система телетрафика. Для ее анализа, в первую очередь, необходимо оценить параметры потока заявок (IP-пакетов) в каждом узле коммутации, входящем в состав анализируемого маршрута.

Для модели, описывающей маршрут обмена IP-пакетами, получены необходимые вероятностно-временные характеристики в виде приближенных соотношений. Для них приведены оценки возникающей погрешности вычислений. Важным частным случаем работы NGN в ЧС считается ситуация, когда в сети перегружен только один из узлов коммутации. Для такой модели получены соотношения, поз-

воляющие с приемлемой для практики точностью рассчитать необходимые вероятностно-временные характеристики.

При некоторых ЧС фиксируется весьма высокий уровень перегрузки отдельных компонентов NGN. Ряд норм на показатели качества обслуживания мультисервисного трафика задан МСЭ со своего рода запасом. Этот факт позволяет перейти на период перегрузки NGN к другим нормам, которые названы приемлемыми. В пояснительной записке приведен перечень численных значений параметров, которые предлагается нормировать для периода действия ЧС.

**В пятой главе** диссертационной работы приведены рекомендации, сформулированные для условий функционирования NGN в ЧС. Для эффективного обслуживания трафика предложен и обоснован комплекс организационно-технических мер. Эти меры используют прямые и косвенные методы снижения трафика. Они предусматривают использование ресурсов других (по отношению к NGN) сетей электросвязи и средств массовых коммуникаций для информирования пользователей телекоммуникационной системы о характере ЧС и методах предотвращения возможных негативных последствий.

Разработан алгоритм восстановления связности NGN при возникновении разрушающих последствий. Предлагаемая последовательность операций направлена на построение структуры в виде остовного дерева, которое обеспечивает создание маршрута обмена IP-пакетами между любой парой узлов коммутации.

В конце пятой главы диссертационной работы перечислены актуальные направления дальнейших исследований, которые опираются на три источника. Ими предложено считать совершенствование алгоритмов функционирования NGN, позволяющих повысить эффективность обслуживания трафика в тот период, когда ощущаются последствия ЧС, новые возможности телекоммуникационной системы, заключающиеся в ее эволюционных тенденциях, и использование результатов исследований на базе междисциплинарного подхода. Среди направлений междисциплинарных исследований особое внимание следует уделить когнитивным технологиям.



В текст диссертационной работы включены три приложения. В Приложении А содержатся копии актов внедрения результатов диссертационной работы. В Приложении Б приведены результаты измерения трафика, типичного для ЧС. В Приложение В включены результаты имитационного моделирования для фрагмента телекоммуникационной системы, построенного на базе технологии "коммутация каналов". Эта технология не используется в NGN, но в течение длительного периода времени будет сосуществовать с пакетными методами передачи и коммутации. По этой причине оценка качества функционирования систем с коммутацией каналов представляется актуальной задачей.

## **1. Анализ принципов модернизации телекоммуникационной системы**

### **1.1 Ключевые аспекты развития телекоммуникационной системы**

Эволюция телекоммуникационной системы – сложный процесс, который обычно рассматривается с разных точек зрения [43, 74, 75, 187, 188]. С учетом тематики проводимых исследований основной акцент сделан на тех аспектах развития телекоммуникационной системы, которые в той или иной мере интересны для периода времени, когда ощущаются последствия ЧС. В первую очередь, из всех возможных направлений эволюции телекоммуникационной системы следует выделить переход к NGN [6, 36, 38, 180, 248].

Основные положения NGN сформулированы в рекомендациях сектора стандартизации телекоммуникаций МСЭ (МСЭ-Т), с которыми можно ознакомиться на сайте этой международной организации – [www.itu.int](http://www.itu.int). Базовые принципы реализации NGN содержатся в рекомендациях серии "Y". Эта серия рекомендаций, кроме NGN, посвящена также глобальной информационной инфраструктуре [21] и протоколу Интернет – IP [152]. К моменту завершения работы над этой главой диссертации было опубликовано несколько книг о концепции NGN, упомянутых выше, а также множество статей в отраслевых журналах. Это обстоятельство позволяет не повторять уже известные положения, а сосредоточиться на тех особенностях концепции NGN, которые существенны с точки зрения рассматриваемых в диссертации вопросов.

Целесообразно проанализировать модель NGN, которая отражает важнейшие особенности новой парадигмы модернизации телекоммуникационной системы. С учетом положений, сформулированных в рекомендациях МСЭ-Т, модель NGN представлена на рисунке 1.1. Она не включает ряд компонентов, которые не представляют интереса для решения задач, составляющих предмет диссертацион-

ного исследования. Такой подход приемлем для последующего перехода к математическим моделям сети электросвязи и ее отдельных компонентов [138, 144].

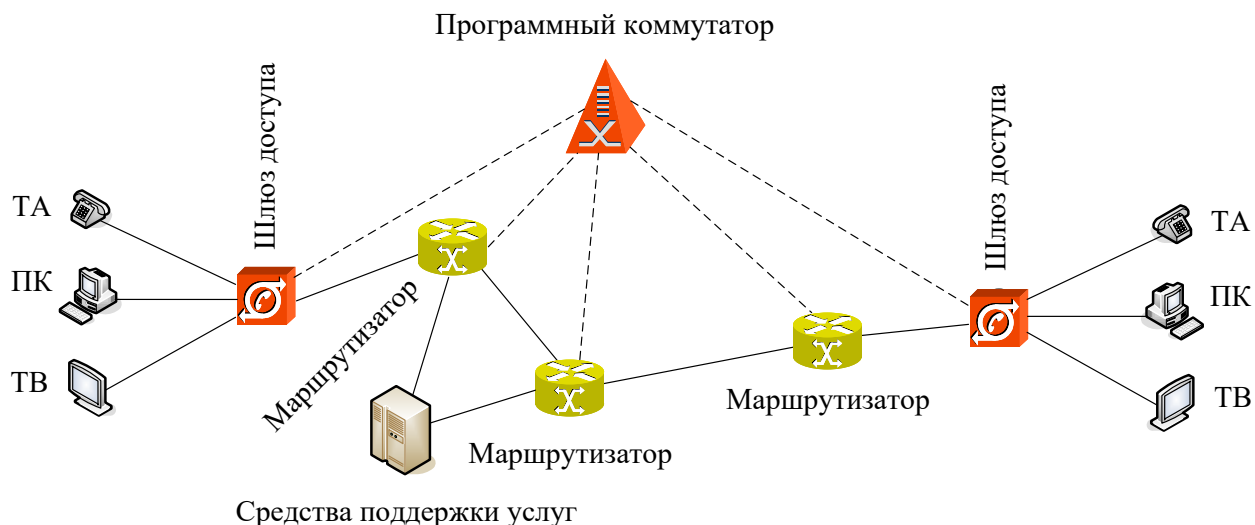


Рисунок 1.1 – Модель NGN – сети следующего поколения

В шлюз доступа включены терминалы пользователей. На рисунке 1.1 показаны наиболее распространенные терминалы: телефонный аппарат (ТА), персональный компьютер (ПК) и телевизор (ТВ). Для этих терминалов можно рассматривать два типичных варианта организации связи. Во-первых, соединения устанавливаются с терминалами других пользователей. Во-вторых, часть соединений направлена на установление связи со средствами поддержки услуг (например, с операторами ЦОВ – центра обслуживания вызовов).

В любом случае полезная информация, представленная в виде совокупности IP-пакетов, пройдет через несколько маршрутизаторов. С точки зрения классической теории сетей связи [12, 43, 187] их следует рассматривать как узлы коммутации (УК). Функции управления шлюзами доступа и маршрутизаторами возложены на программные коммутаторы SoftSwitch [33]. Он также известен по аббревиатуре MGC – Media Gateway Controller (контроллер транспортного шлюза). В рассматриваемой модели используется только один такой коммутатор. Его функции, согласно теории сетей связи, похожи на задачи, решаемые системой управления. Необходимо отметить, что использование коммутаторов SoftSwitch в сетях связи предшествующих поколений не предусматривалось.

Важнейшая особенность концепции NGN заключается в применении пакетных технологий передачи и коммутации для всех видов информации. Преимущества пакетных технологий для интегральных сетей были убедительно доказаны ранее [61], но их практическая реализация стала возможной только в начале XXI века. В результате первого опыта построения сетей на основе пакетных технологий были выявлены их потенциальные недостатки [254]. Они заключаются в рисках, среди которых следует указать возможность заметного снижения показателей качества обслуживания, более известных по аббревиатуре QoS [231, 233, 236] – Quality of Service.

Ухудшение качества обслуживания трафика любого рода рассматривается как крайне нежелательный процесс. Он снижает конкурентоспособность Оператора связи, а при возникновении ЧС ухудшение показателей качества обслуживания может привести к катастрофическим последствиям. По этой причине исследованию возможных причин снижения качества обслуживания и разработке мер по предотвращению последствий этого явления посвящены отдельные (третья и четвертая) главы диссертации. Возможности эффективного обслуживания трафика закладываются при выборе стратегии создания сети. Предтечей такой стратегии можно считать концепцию "наложенной сети", разработанную для оптимальной цифровизации городских телефонных сетей [136]. Эта концепция была утверждена Министерством связи СССР и стала обязательным документом для цифровизации местных телефонных сетей. При переходе к NGN были разработаны аналогичные принципы [187], но они пока не трансформированы в нормативные документы Минкомсвязи России.

Кроме перехода к NGN в состав ключевых аспектов развития телекоммуникационной системы необходимо включить процессы конвергенции, интеграции и консолидации [77, 188]. Эти процессы присущи самой концепции NGN, но проявляются также и самостоятельно. С точки зрения обеспечения высокой надежности телекоммуникационной системы в ЧС важная роль отводится конвергентным решениям, характерным для тех систем проводного и беспроводного доступа, которые обеспечивают выполнение идентичных функций. Особое значение придается

процессам консолидации, направленным на использование ресурсов, принадлежащих разным Операторам связи. Аспекты практического использования тех положительных свойств, которые характерны для процессов конвергенции, интеграции и консолидации, можно прокомментировать на трех примерах.

Первый пример касается процессов конвергенции в сетях фиксированной и мобильной связи. На рисунке 1.2 показаны два варианта доступа в сети телефонной связи и Интернет. Верхняя часть модели иллюстрирует способ доступа за счет использования средств фиксированной связи. В частности, предполагается, что в двухпроводной физической цепи устанавливается оборудование xDSL (цифровая абонентская линия стандарта "x") для подключения ТА в телефонную сеть и ПК в сеть Интернет. В нижней части модели изображен мобильный терминал, который через базовую станцию (БС) может подключаться к тем же двум сетям.

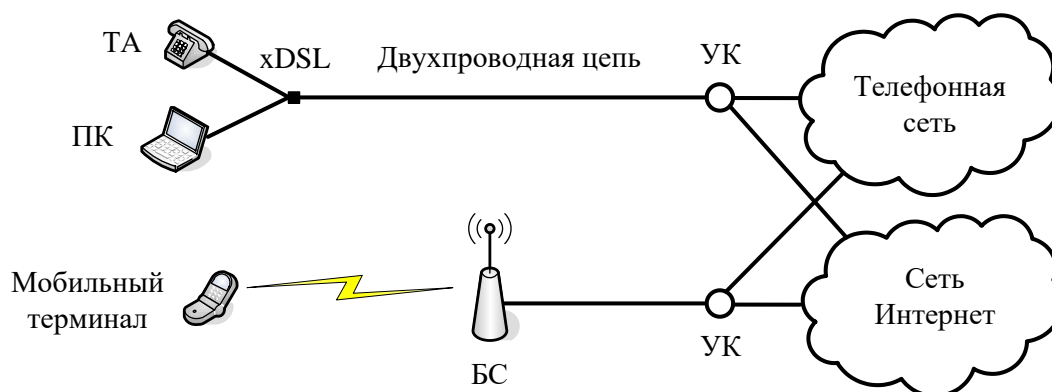


Рисунок 1.2 – Пример процессов конвергенции для сетей доступа

Конвергенция сетей фиксированной и мобильной связи (как процесс приобретения общих свойств в результате процессов эволюции) привела к тому, что функциональные возможности обоих видов доступа и качество предоставления услуг практически идентичны. Для режима ЧС это обстоятельство очень важно с точки зрения обеспечения высокой надежности доступа к ресурсам телекоммуникационной системы.

Второй пример связан с интеграционными процессами. Рисунок 1.3 иллюстрирует идею построения единой транспортной (первичной) сети [43]. Ее ресур-

сы предназначены для того, чтобы обеспечить каналами и трактами все коммутируемые (вторичные) сети. Перечень этих сетей ограничен пятью потребителями транспортных ресурсов.

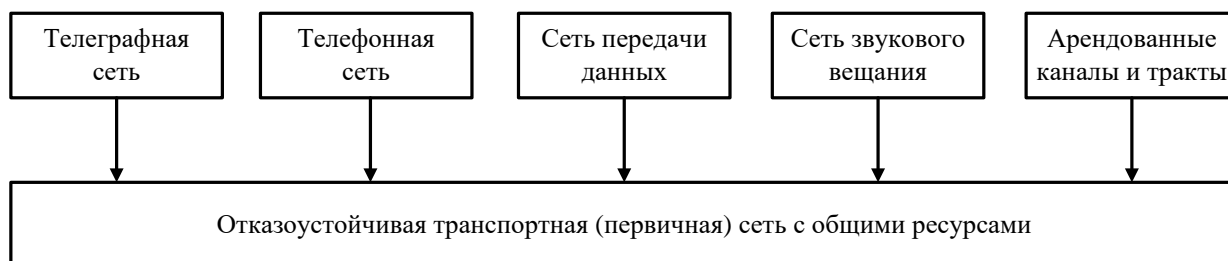


Рисунок 1.3 – Пример процессов интеграции на базе общей транспортной сети

Суть интеграции заключается в решении двух задач. Во-первых, обеспечивается экономичное построение транспортной сети, способной обеспечить ресурсами всех потенциальных потребителей. Во-вторых, транспортная сеть строится за счет применения отказоустойчивых топологий (в последние годы – кольцевых структур), что позволяет поддерживать высокие показатели надежности, установленные для современных коммутируемых сетей. Последнее обстоятельство представляется особо важным в период действия ЧС для надежной поддержки важнейших телекоммуникационных и информационных услуг.

Третий пример – использование процессов консолидации. Он может быть проиллюстрирован возможностью использования ресурсов, принадлежащих другим Операторам связи. На рисунке 1.4 показан частный случай такого процесса при взаимодействии двух Операторов связи.

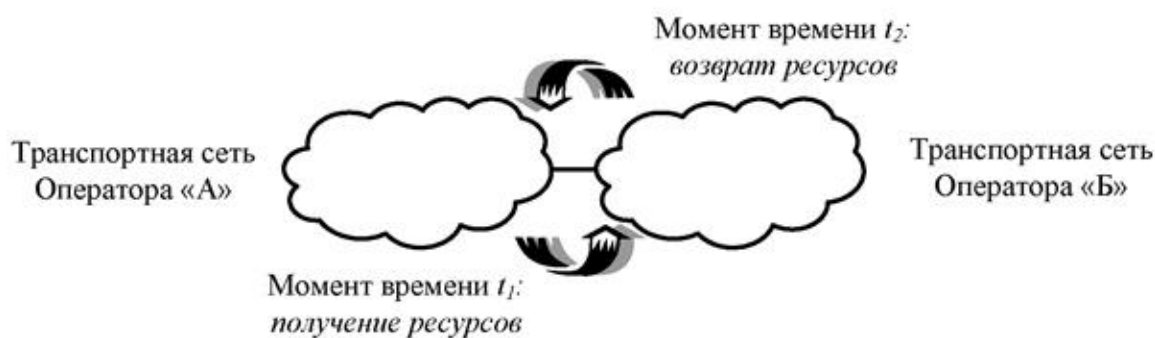


Рисунок 1.4 – Пример процессов консолидации для транспортных ресурсов

Предполагается, что в момент времени  $t_1$  у Оператора связи "А" возникает необходимость в получении дополнительных транспортных ресурсов. Он обращается к Оператору связи "Б" с соответствующим запросом. Если существует возможность передачи на некоторое время избыточных ресурсов, то на запрос отправляется положительный ответ. В момент времени  $t_2$  (в частности, после ликвидации последствий ЧС) осуществляется процесс по возврату арендованных ресурсов.

Процессы конвергенции, интеграции и консолидации основаны на симбиозе технических и организационных решений. По этой причине их практическая реализация зачастую зависит от нормативно-правовых актов и субъективных факторов. Тем не менее, исследование тех потенциальных возможностей, которые предоставляются процессами конвергенции, интеграции и консолидации представляется важным аспектом при разработке комплекса решений по организации работы телекоммуникационной системы в ЧС.

Как было отмечено выше, еще не приняты нормативные документы, детально определяющие принципы перехода к NGN. Для разработки рекомендаций по функционированию телекоммуникационной системы после возникновения ЧС необходимо исследовать ряд особенностей перехода к NGN. Эти особенности, в первую очередь, связаны с поддержкой показателей качества обслуживания мультисервисного трафика. Для решения такой задачи необходима минимизация количества переходов с одной технологии коммутации на другую.

## **1.2 Особенности перехода к сети связи следующего поколения**

### **1.2.1 Стратегии и сценарии перехода к NGN**

Практическая реализация концепции NGN может быть выполнена за счет использования разных стратегий. Выбор стратегии осуществляется в результате

анализа большого количества факторов, среди которых важнейшее значение отводится экономическим соображениям. Тем не менее, обязательно должны учитываться ограничения технического характера, включая те из них, которые касаются функционирования NGN в ЧС.

Для выбора стратегии перехода к NGN представляется логичным выделить пять ключевых аспектов развития телекоммуникационной системы с точки зрения выполнения сетью электросвязи своих основных функций:

- переход к пакетным технологиям передачи, коммутации и обработки информации;
- обслуживание едиными сетевыми ресурсами мультисервисного трафика для обмена информации в виде речи, данных и видео;
- введение новых показателей качества обслуживания трафика, учитывающих особенности применения пакетных технологий;
- совпадение во времени реализации концепции сети связи следующего поколения и введения Системы-112 для обслуживания вызовов экстренных оперативных служб по единому номеру, принятому для всех стран Европы;
- дополнение системы управления телекоммуникационной системы совокупностью процедур, необходимых для работы сети электросвязи в условиях ЧС.

Современному этапу модернизации телекоммуникационной системы присущи специфические особенности, определяемые внутренними и внешними факторами. Важнейший внутренний фактор – длительное существование фрагментов сети электросвязи, построенных на разных технологиях передачи и коммутации (канальной и пакетной). Среди внешних факторов необходимо выделить постоянно возрастающие требования потенциальных пользователей к скорости доступа в сеть и к показателям качества обслуживания мультисервисного трафика.

Для организации работы телекоммуникационной системы в ЧС необходимо исследовать стратегии перехода к NGN. Результаты этого исследования позволяют решить две задачи. Первая задача заключается в формировании принципов



функционирования телекоммуникационной системы в ЧС, если стратегия уже выбрана и процесс ее реализации не может быть изменен. Вторая задача актуальна в том случае, когда стратегия создания NGN еще не выбрана или ее можно изменить. Тогда возникает возможность использования принципов перехода к NGN, которые обеспечивают эффективное функционирование телекоммуникационной системы и в штатных условиях эксплуатации, и в условиях ЧС.

Выбор стратегии перехода к NGN может быть сведен к анализу кривых чистой приведенной стоимости, обозначаемой обычно как  $NPV(t)$ . Иногда используются другие переводы термина  $NPV$  (Net present value) – чистая текущая стоимость или чистый дисконтированный доход. Величина  $NPV(t)$  представляет собой сумму дисконтированных значений потока платежей, приведенных к сегодняшнему дню [135, 205]. Значение  $NPV$  можно также интерпретировать как общую прибыль инвестора.

Для построения функции  $NPV(t)$  предварительно оцениваются поток платежей через  $t$  лет (могут использоваться и другие единицы времени), обозначаемый обычно как  $CF_t$ , и начальные инвестиции  $IC$ . Название этих двух переменных заимствованы из экономики: поток платежей на английском языке называется Cash Flow ( $CF$ ), а начальные инвестиции – Invested Capital ( $IC$ ). Кроме двух упомянутых аргументов необходимо выбрать значение  $i$  – ставки дисконтирования [205]. Тогда функция  $NPV(t)$ , оцениваемая в течение  $N$  периодов времени, вычисляется по такой формуле [135, 205]:

$$NPV(t) = \sum_{t=0}^N \frac{CF_t}{(1+i)^t} = -IC + \sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+i)^t}. \quad (1.1)$$

Анализ нескольких кривых  $NPV(t)$  при наличии альтернативных решений обычно сопровождается оценкой возникающих рисков [80, 150]. Выбором альтернативы, в контексте рассматриваемой задачи, следует считать определение той стратегии перехода к NGN, которая будет реализована на практике. Подобные функции возлагаются на лицо, принимающее решение (ЛПР), роль которого

обычно играет Оператор связи. Функции лица, обосновывающего решение (ЛОР), чаще всего выполняет группа экспертов. Связка ЛПР – ЛОР [89] позволяет формализовать описание процесса принятия решений.

Модель телекоммуникационной системы при организации связи между тремя интерфейсами пользователь-сеть (ИПС) показана на рисунке 1.5. Она включает NGN-пространство и две сети – телефонную общего пользования (ТфОП) и документальной электросвязи (СДЭ). На практике в пределах NGN-пространства могут располагаться несколько сетей класса NGN, созданных разными Операторами связи. Предложенная модель инвариантна к стратегии модернизации телекоммуникационной системы.

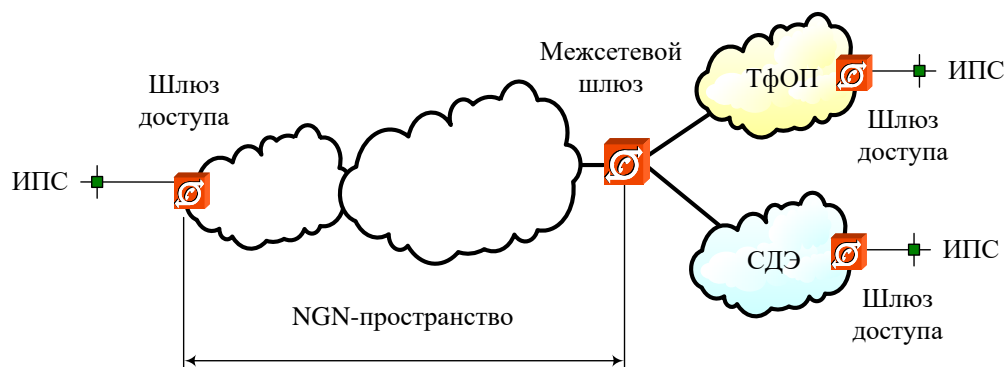


Рисунок 1.5 – Организация связи между интерфейсами пользователь-сеть

Задачи управления ресурсами ТфОП в ЧС, в основном, решены, но ряд дополнительных рекомендаций необходимо сформулировать на основании результатов, полученных при исследовании поведения NGN в нештатных ситуациях. Задачи управления ресурсами СДЭ в ЧС, в основном, решены [95].

Аналогичные решения для NGN могут быть получены только после конкретизации стратегии, выбранной для модернизации телекоммуникационной системы. Теоретически можно использовать несколько стратегий формирования NGN, но для гарантированного соблюдения нормированных показателей качества обслуживания мультисервисного трафика практически интересным становится только решение, названное в [187] "расширяющимся ядром". Суть этой стратегии иллюстрирует рисунок 1.6. Предполагается, что переход к NGN происходит в процессе эволюции ТфОП.

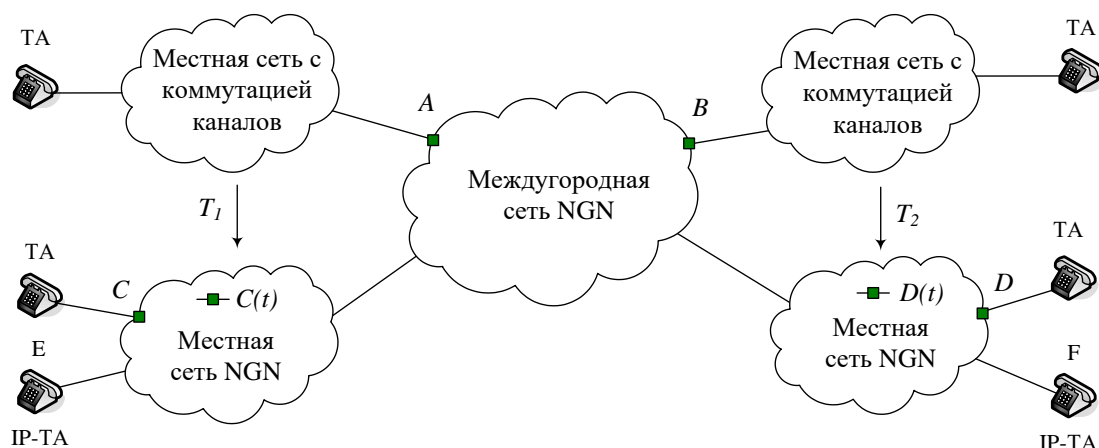


Рисунок 1.6 – Формирование NGN согласно стратегии "расширяющееся ядро"

Рассматриваемая модель состоит из междугородной сети NGN, в составе которой при необходимости можно выделить компонент "зоновая сеть", а также двух местных сетей. Они входят в состав ТфОП. По этой причине для них – в верхней части модели – указан вид технологии распределения информации (коммутация каналов).

Предполагается, что сначала осуществляется переход на пакетные технологии на уровне междугородной сети. Такой подход, судя по публикациям в зарубежной научно-технической литературе, был выбран всеми развитыми странами. При связи двух ТА из разных местных сетей в установленном соединении будет присутствовать только одно NGN-пространство, расположенное между точками  $A$  и  $B$ . Это значит, что в разговорном тракте только по одному разу будет выполняться переход от технологии "коммутация каналов" к технологии "коммутация пакетов" и обратно. Несложно показать, что только такое условие обеспечит выполнение показателей QoS, установленных для NGN [236].

Следовательно, на начальном этапе формирования NGN пакетные технологии передачи и коммутации применяются только в междугородной сети, которая и образует своего рода "ядро". При модернизации местных (городских и сельских) телефонных сетей пакетные технологии передачи и коммутации начинают использоваться за пределами "ядра". Этот процесс был назван в [187] расширением.

При установлении соединения между ТА двух разных местных сетей с коммутацией каналов преобразование технологий передачи и коммутации происходит в точках (интерфейсах)  $A$  и  $B$ . Они расположены на границах междугородной сети. Предполагается, что интерфейсы в точках  $A$  и  $B$  реализованы до моментов времени  $T_1$  и  $T_2$ , которые определяют старт процессов формирования NGN на уровне местных телефонных сетей.

Предположим, что момент времени  $T_1$  наступает раньше момента времени  $T_2$ . В точке  $t > T_1$  интерфейс  $C$ , в котором выполняется преобразование технологий передачи и коммутации, находится в границах левого облака "Местная сеть NGN". Он обозначен как  $C(t)$ , чтобы подчеркнуть следующий факт: в течение процесса формирования местной сети NGN интерфейс смещается от точки  $A$  (на выходе в междугородную сеть) к точке  $C$  (на входе в сеть доступа). При использовании ТА, содержащего преобразователь речевого сигнала в последовательность IP-пакетов (терминал такого вида обозначен на рисунке 1.6 как IP-ТА), следует говорить о точке  $E$ . Если момент времени  $T_2$  еще не настал, то NGN-пространство занимает участок между интерфейсами  $B$  и  $C$  или  $B$  и  $E$  в зависимости от типа используемого терминала.

Моменты времени  $T_1$  и  $T_2$  не будут сильно различаться между собой. Следовательно, уместно говорить о расширении NGN-пространства, от пространства между интерфейсами  $A$  и  $B$  до фрагмента между точками  $C(t)$  и  $D(t)$ . Но в перспективе этот фрагмент расширяется, как минимум, до границ  $C$  и  $D$ . Постепенно эти интерфейсы будут мигрировать в точки  $E$  и  $F$  соответственно. Тогда словосочетание "NGN-пространство" становится бессмысленным, так как никакой другой сети (то есть, наличия средств передачи и коммутации с иными технологиями) за пределами NGN не будет.

Обозначения  $C(t)$  и  $D(t)$  имеют смысл на этапе сосуществования NGN и ТфОП (как важной составной части ССОП – сети связи общего пользования). В период сосуществования NGN и ТфОП могут возникать проблемы снижения по-

казателей QoS, если Оператор связи не будет придерживаться четкой стратегии модернизации системы связи. Это условие, выражаясь терминами математики и логики [140], следует считать необходимым, но не достаточным. Достаточность может быть достигнута только при правильном выборе набора сценариев по переходу к NGN. Характеристики этих сценариев и принципы их выбора изложены в монографии [90].

На рисунке 1.7 показана модель соединения между двумя окончными УК под номерами "1" и " $k + m$ ". Данная модель включает две плоскости, отображающие структуры двух сетей – сигнализации (signalling network) и коммутации (switched network) соответственно.

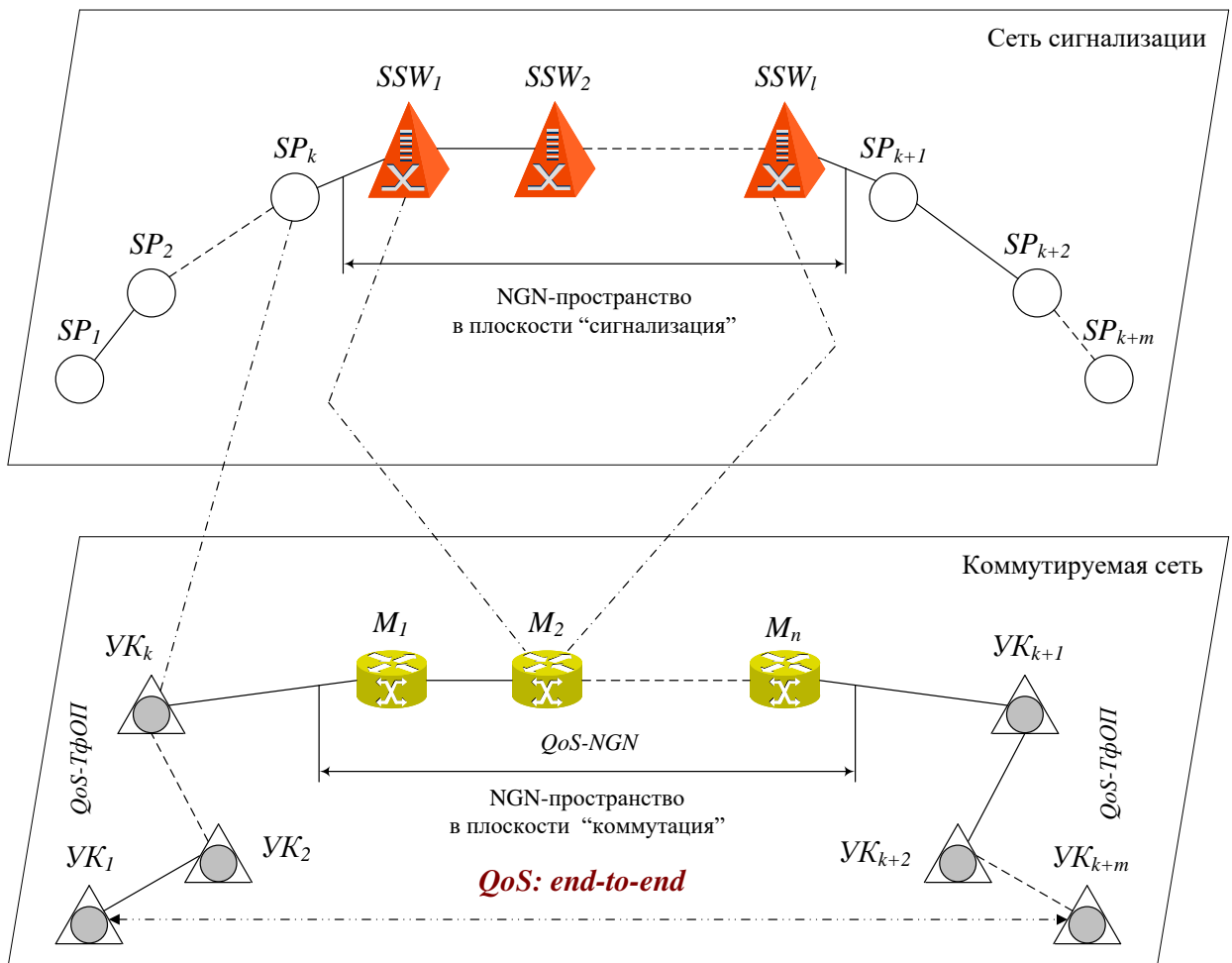


Рисунок 1.7 – Модель соединения между окончными узлами коммутации

При разработке модели использованы термины рекомендаций МСЭ-Т серий "Г", "Q" и "Y". В нижней плоскости предложенной модели изображены три фраг-

мента ССОП. Левый фрагмент состоит из нескольких УК, входящих в состав ТфОП, количество которых равно  $k$ . Для этих УК существенны показатели QoS, нормированные для ТфОП. Они так и обозначены: QoS-ТфОП. Центральный фрагмент представляет собой NGN-пространство. Он состоит из  $n$  маршрутизаторов (они на рисунке 1.7 обозначены как  $M_i, i = \overline{1, n}$ ). Для этого компонента модели также определены показатели QoS. Они названы QoS-NGN. Правый фрагмент модели аналогичен левому и состоит из  $m$  УК.

В рекомендациях МСЭ-Т серии Q.700 предложено рассматривать аппаратно-программные средства УК как пункт сигнализации – signalling point (SP). Функции SP заключаются в формировании, передаче, приеме и интерпретации сигнальной информации. Применительно к ТфОП справедливо равенство количества УК и SP. Дело в том, что SP представляет собой логическую конструкцию. Этот факт отмечен на рисунке 1.7 штрихпунктирной линией между УК и SP под номером  $k$ .

Для NGN ситуация меняется. Все функции SP выполняет программный коммутатор SoftSwitch (SSW). В центральной части верхней плоскости рассматриваемой модели показано  $l$  коммутаторов SoftSwitch. Они не жестко связаны с маршрутизаторами. Например, для второго маршрутизатора показаны связи с двумя коммутаторами SoftSwitch – под номерами "1" и " $l$ ". Организация связи между маршрутизаторами и коммутаторами SoftSwitch осуществляется так, чтобы между ними существовали, как минимум, два пути обмена информацией, проходящих по разным трассам.

Величины  $k$  и  $m$  определяются принципами построения ТфОП [156]. Значения  $l$  и  $n$  рассчитываются при проектировании сетей класса NGN. При соблюдении стратегии формирования NGN, кратко изложенной в начале этого раздела, величины  $k$  и  $m$  определяются структурами местных телефонных сетей. С точки зрения показателей QoS наихудшим случаем будет следующий:

- левый и правый фрагменты на нижней плоскости предложенной модели соответствуют городским телефонным сетям, построенным с узлами исходящего и входящего сообщения [56];
- в сетях доступа обеих городских телефонных сетей используются выносные модули (ВМ) – концентраторы или учрежденческие станции.

С учетом принятых допущений можно составить модель соединения между двумя ИПС, устанавливаемого через максимальное количество УК, что характерно для организации междугородной связи. Для сценария "наложенная сеть" [136] эта модель показана в верхней части рисунка 1.8. В нижней части рисунка 1.8 та же модель изображена в виде графа. Данное решение представляется логичным с точки зрения вопросов надежности ССОП. Интерфейсам ИПС соответствуют вершины графа  $a_1$  и  $a_8$ , ВМ –  $a_2$  и  $a_7$ , районным автоматическим телефонным станциям (РАТС) –  $a_3$  и  $a_6$ , узлу исходящего сообщения (УИС) и узлу входящего сообщения междугородного (УВСМ) –  $a_4$  и  $a_5$  соответственно.

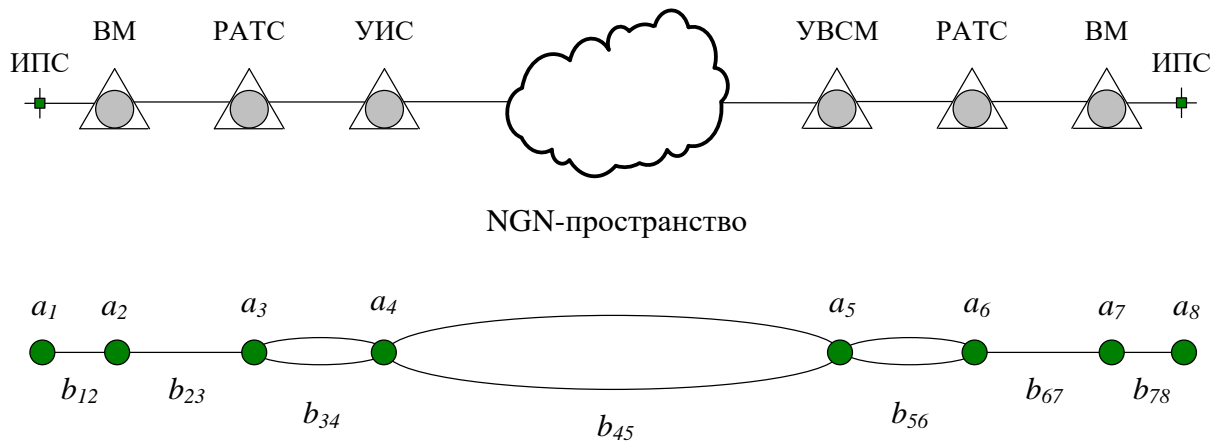


Рисунок 1.8 – Модель соединения между ИПС для "наложенной сети"

Два ребра, соединяющие некоторые пары вершин ( $a_3$  и  $a_4$ ,  $a_4$  и  $a_5$ ,  $a_5$  и  $a_6$ ), отражают тот факт, что на соответствующих участках ТфОП создаются кольцевые топологии [187, 208]. На остальных участках ТфОП (в сетях доступа) используются звездообразные и древовидные структуры [43, 136]. Кроме того, оборудование УИС и УВСМ, как правило, разносится на две площадки (или более), что

обеспечивает высокую надежность этих двух УК в составе ТфОП. По этой причине основные сложности возникают с обеспечением надежности (и живучести) шести вершин  $a_1, a_2, a_3, a_6, a_7$  и  $a_8$ , а также четырех ребер  $b_{12}, b_{23}, b_{67}$  и  $b_{78}$ .

Для сценария перехода к NGN, основанного на прагматическом подходе [187], наихудшим случаем также становится междугородное соединение. Принципы организации связи будут иными. Они показаны на рисунке 1.9, в котором, как и для предыдущей модели, в нижней части иллюстрации показан граф маршрута обмена IP-пакетами.

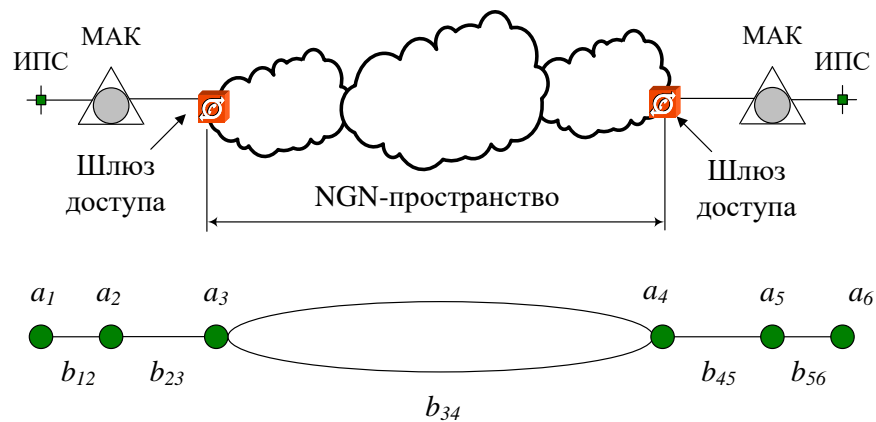


Рисунок 1.9 – Модель соединения между ИПС для прагматического подхода

Прагматический подход основан на установке мультисервисных абонентских концентраторов (МАК на рисунке 1.9) в зоне действия каждой РАТС. В результате NGN-пространство занимает территорию, которая выходит за границы междугородной сети. Это пространство включает также фрагменты двух местных сетей за пределами участков доступа. При практической реализации NGN-пространства выбираются отказоустойчивые структуры, что позволяет считать участок сети  $a_3 - b_{34} - a_4$  весьма надежным. Основные проблемы связаны с фрагментами сетей доступа:  $a_1 - b_{12} - a_2 - b_{23} - a_3$  и  $a_4 - b_{45} - a_5 - b_{56} - a_6$ .

Очевидно, что выбор сценария перехода к NGN производится с учетом факторов, которые не связаны с проблемами, возникающими в ЧС. Тем не менее, сравнение структур, показанных на рисунках 1.8 и 1.9, показывает, что при прочих равных условиях прагматический сценарий построения NGN позволяет обес-



печить более высокие показатели надежности ССОП при возникновении ЧС. Данное обстоятельство следует учитывать при обосновании и принятии решения о принципах перехода к NGN.

### 1.2.2 Модель системы электросвязи в виде "черного ящика"

Основные задачи, возложенные на телекоммуникационную систему в штатном режиме ее функционирования, хорошо известны [36, 43, 187]. Эти задачи, с точки зрения вопросов, исследуемых в диссертационной работе, удобно рассматривать с позиций системного анализа [144, 151, 193, 204]. Исследуемый объект представляется в виде большой и сложной системы, которая, в общем случае, может рассматриваться как "черный ящик" [11]. Модель телекоммуникационной системы в виде "черного ящика" приведена на рисунке 1.10. Она включает два элемента – управляющую и управляемую системы, которые обмениваются между собой командами и отчетами.

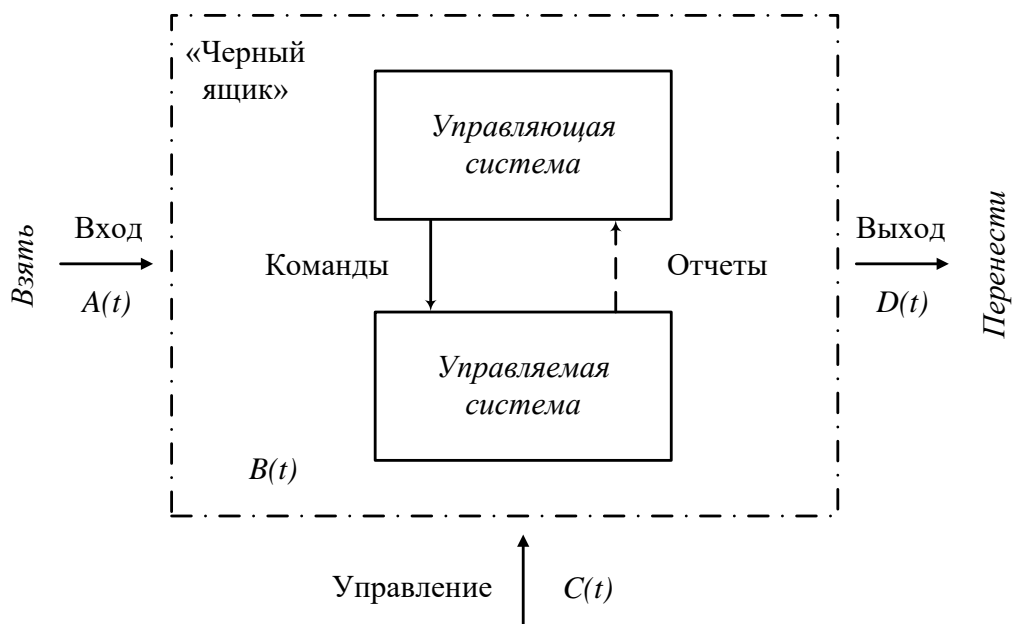


Рисунок 1.10 – Модель телекоммуникационной системы в виде "черного ящика"

Процесс  $A(t)$  на входе модели, как правило, является случайным [26]. Процесс функционирования модели может быть описан суперпозицией двух процессов –  $B(t)$  и  $C(t)$ . В штатных условиях функционирования основная роль отводится процессу  $B(t)$ . Процесс  $C(t)$  представляет собой формализованное воздействие на модель функций управления, которые определяются на основе информации о работе исследуемого объекта. Процесс  $D(t)$  описывает результат функционирования модели.

Процессы  $A(t)$  и  $D(t)$  удобно рассматривать как формализованное описание связки операций "взять и перенести". Применительно к телекоммуникационной системе эти глаголы означают следующее: надо "взять" информацию в точке  $x$  и "перенести" ее в точку  $y$ . В ряде случаев вместо точек  $x$  и  $y$  удобнее оперировать множествами  $\{X\}$  и  $\{Y\}$  соответственно. При этом – с точки зрения пользователей телекоммуникационной системы – можно выделить три важных требования:

- информацию необходимо доставить с учетом ограничений по времени;
- потери в составе передаваемой информации не должны превышать заранее заданный уровень;
- искажения в принятых сообщениях не могут быть большими, чем заданные пороговые значения.

Перечисленные требования нормируются, как минимум, средними значениями измеряемых или оцениваемых параметров, которые по своей природе являются случайными величинами. В последние годы в рекомендациях МСЭ в дополнение к среднему значению (математическому ожиданию) нормируется квантиль соответствующей функции распределения (ФР) или дисперсия оцениваемой случайной величины. Предположим, что три перечисленных выше требования заданы ФР вида  $F(t)$ ,  $F(l)$  и  $F(d)$ . Тогда при нормировании средних значений  $T^{(1)}$ ,  $L^{(1)}$  и  $D^{(1)}$ , а также квантилей ФР  $T_p$ ,  $L_p$  и  $D_p$  установленные нормы могут быть представлены в таком виде:

$$t^{(1)} \leq T^{(1)}, \quad l^{(1)} \leq L^{(1)}, \quad d^{(1)} \leq D^{(1)}, \quad t_p \leq T_p, \quad l_p \leq L_p, \quad d_p \leq D_p. \quad (1.2)$$

Процесс  $A(t)$  на входе модели телекоммуникационной системы обычно рассматривается с двух точек зрения:

- способ характеристики потока заявок, обслуживаемых "черным ящиком" как системой телетрафика [10, 69, 70];
- метод описания атрибутов надежности и живучести "черного ящика" [31, 50, 157].

При анализе "черного ящика" как системы телетрафика  $A(t)$  обычно рассматривается как ФР длительности интервалов между моментами поступления соседних заявок (для NGN под заявкой понимается IP-пакет). Функция  $B(t)$  описывает распределение времени обслуживания заявок. Распределение выходящего потока отображается функцией  $D(t)$ . Процесс  $C(t)$  позволяет менять вид ФР  $A(t)$  и  $B(t)$ , а также модифицировать дисциплину обслуживания заявок. При нарушении штатных режимов работы телекоммуникационной системы, в частности, при росте интенсивности входящего потока  $\lambda$  часть заявок определенного вида может не обслуживаться, а также вводиться приоритетная обработка для некоторых видов трафика.

При анализе надежности и живучести "черного ящика" процесс  $A(t)$  используется для описания возможных переходов отдельных элементов системы из состояния "работоспособность" в состояние "отказ" [50]. В этом случае процесс  $B(t)$  определяет способность исследуемой системы выполнять свои функции при отказе части элементов без внешнего воздействия. При необходимости внешнего воздействия (помощи) выполняемые операции отображаются процессом  $C(t)$ . В диссертационной работе дестабилизирующими факторами предполагаются разрушающие воздействия ЧС. Результаты реакции "черного ящика" на подобные факторы представимы процессом  $D(t)$ .

Например, в эксплуатируемой NGN на основании проектных решений до момента  $t$ , когда возникает ЧС, известны доступные ресурсы  $V_{IP}(t - \Delta t)$ , обеспе-

чивающие предоставление услуг с установленными качественными показателями. При возникновении ЧС часть ресурсов  $V_O(t)$  переходит в состояние "отказ". Кроме того, в ряде случаев произойдет выбытие ресурсов объемом  $V_A(t)$ , передаваемых службам, которые задействованы в ликвидации последствий ЧС. Это значит, что объем ресурсов  $V_{ЧС}(t)$ , которыми будет располагать Оператор связи, снизится:

$$V_{ЧС}(t) = V_{IP}(t - \Delta t) - V_O(t) - V_A(t). \quad (1.3)$$

На период действия ЧС устанавливается новая совокупность показателей качества предоставления телекоммуникационных и информационных услуг. Определение их численных значений – одна из задач диссертационной работы, которая будет рассмотрена ниже. Для обеспечения этих показателей необходимо снизить величину обслуживаемого трафика  $Y(t)$ , прогнозируемого при проектировании сети, до уровня  $Y_{ЧС}(t)$ . Уровень  $Y_{ЧС}(t)$  становится максимально допустимой величиной трафика, которую удобно оценивать количеством обрабатываемых IP-пакетов в единицу времени (обычно – за одну секунду), в течение периода  $T_{ЧС}$ , заканчивающегося после полной ликвидации последствий ЧС. За период  $T_{ЧС}$ , как показали результаты измерений, происходят существенные колебания трафика  $Y(t)$  с высокой скоростью, оцениваемой первой производной  $Y'(t)$ . Время обслуживания заявок (обработки IP-пакетов) в NGN практически постоянно [137, 219, 228]. По этой причине процесс  $Y(t)$  в значительной мере определяется распределением  $A(t)$ .

При возникновении ЧС требования пользователей к телекоммуникационной системе по своему смыслу не меняются, но иначе расставляются акценты:

- информацию, существенную для периода ЧС, необходимо доставить с учетом ограничений по времени;
- потери в составе информации, важной для периода ЧС, не должны превышать заранее заданный уровень;

- искажения в принятых сообщениях, существенных для ликвидации последствий ЧС, не могут быть большими, чем заданные пороговые значения.

Перечисленные требования представлены в формализованном виде. С практической точки зрения они формулируются следующими тремя положениями:

Во-первых, при условии  $V_{\text{ЧС}}(t) < V_{\text{ПР}}(t - \Delta t)$  Оператор связи должен провести реконфигурацию имеющихся ресурсов. Суть этой реконфигурации заключается в том, чтобы обеспечить, как минимум, наличие связности [165, 166] всех УК. Если это невозможно за счет использования ресурсов, находящихся в состоянии работоспособности, то следует воспользоваться резервным оборудованием, предназначенным для оперативного восстановления телекоммуникационной системы.

Во-вторых, при условии  $Y_{\text{ЧС}}(t) > Y(t)$  Оператор связи должен ввести процедуры снижения поступающей нагрузки и, при необходимости, ввести новые дисциплины обслуживания некоторых видов трафика, особо важных для ликвидации последствий ЧС. Подобные операции представляются важнейшим средством для обеспечения устойчивого функционирования телекоммуникационной системы в период действия ЧС.

В-третьих, опыт работы телекоммуникационной системы в период ЧС должен быть тщательно и всесторонне проанализирован с целью превентивной подготовки к будущим нештатным ситуациям разного рода. Подобная подготовка должна также опираться на прогностические оценки возможных последствий ЧС различного вида.

Исследования трафика, обслуживаемого в ЧС ресурсами СДЭ [95], показали, что вне зависимости от процессов отказов в составе УК и линейных сооружений заметно меняется характер потока вызовов, для описания которого вводится ФР  $A(t)$ . Причем в СДЭ меняется и ФР  $B(t)$ , которая характеризует время обслуживания заявок – длительность обработки и передачи сообщений. Применительно к NGN распределение  $B(t)$  необходимо рассматривать с двух точек зрения. Во-

первых, заявкой для УК в составе NGN служит IP-пакет, время обработки которого постоянно. Функция  $B(t)$  применяется далее именно для характеристики обработки IP-пакетов. Ее характер не меняется в период действия ЧС. Во-вторых, под временем обслуживания заявки часто удобно понимать длительности сеанса связи, что полезно, например, для оценки длительности соединения между двумя телефонными терминалами.

Во многих случаях единственным средством для обеспечения устойчивого функционирования NGN в ЧС служит ограничение мультисервисного трафика. Примечательная особенность этого трафика заключается в следующем: значительная доля обслуживаемых IP-пакетов в NGN порождается развлекательными услугами. Их поддержка может осуществляться в ограниченном объеме или полностью прекращаться до ликвидации последствий ЧС. Кроме того, ограничения трафика могут применяться и для других видов услуг, если они прямо или косвенно не способствуют ликвидации последствий ЧС и не служат средством обмена экстренной информацией между абонентами телекоммуникационной системы.

Ограничение трафика в ЧС осуществляется при помощи алгоритма, типичного для управления сетями электросвязи [1, 203]. Возможность его применения с правовой точки зрения подтверждается соответствующим Постановлением Правительства Российской Федерации [164]. Этот алгоритм показан на рисунке 1.11.

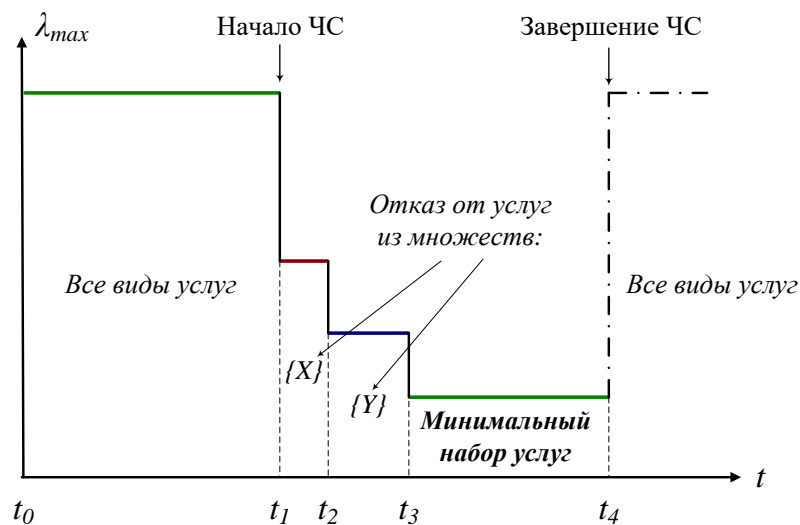


Рисунок 1.11 – Алгоритм ограничения трафика в ЧС

Предположим, что на отрезке времени  $[t_0, t_1)$  телекоммуникационная система функционирует в штатном режиме. В момент времени  $t_1$  возникает ЧС, последствия которой сразу же сказываются на свойствах сети NGN. На отрезке времени  $[t_1, t_2)$  осуществляется отказ от набора услуг, образующего множество  $\{X\}$ . Если установленные показатели качества обслуживания не обеспечиваются, то на отрезке времени  $[t_2, t_3)$  не поддерживаются еще ряд услуг, принадлежащих множеству  $\{Y\}$ . Процесс продолжается до тех пор, пока обслуживается только трафик, обусловленный минимальным набором услуг.

Такое положение сохраняется на отрезке времени  $[t_3, t_4)$ . Предполагается, что в момент времени  $t_4$  перестают ощущаться последствия ЧС. В результате может быть восстановлен штатный режим работы телекоммуникационной системы. Следует отметить, что в период времени  $[t_3, t_4)$ , как показали результаты измерений, приведенные в Приложении Б, трафик теряет свойства самоподобия [206]. Это упрощает проведение ряда исследований.

Возможность реализации разработанного алгоритма ограничения трафика в ЧС определяется возникающими последствиями. Их следует рассматривать с двух точек зрения. Во-первых, серьезные препятствия могут порождаться отказами части элементов NGN. Во-вторых, для практического применения предложенного алгоритма необходимо провести исследования вероятностно-временных характеристик, определяющих качество обслуживания мультисервисного трафика. Это требует анализа сложных моделей и разработки ряда новых методов расчета СМО и СеМО.

### 1.2.3 Классификация ЧС и возможных состояний NGN

Официальная классификация ЧС введена Постановлением Правительства Российской Федерации № 304 от 21 мая 2007 года [161]. Это постановление при-

нято во исполнение Федерального закона № 68-ФЗ от 21 декабря 1994 года "О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера" [160]. Федеральным законом №23-ФЗ от 1 апреля 2012 года [159] уточнена трактовка ЧС. Принято следующее определение: "Чрезвычайная ситуация – это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей". Под ликвидацией ЧС следует понимать "... аварийно-спасательные и другие неотложные работы, проводимые при возникновении чрезвычайных ситуаций и направленные на спасение жизни и сохранение здоровья людей, снижение размеров ущерба окружающей среде и материальных потерь, а также на локализацию зон чрезвычайных ситуаций, прекращение действия характерных для них опасных факторов".

Постановлением [161] устанавливается, что ЧС природного и техногенного характера делятся на шесть основных видов: локального, муниципального, межмуниципального, регионального, межрегионального и федерального характера. Для перечисленных видов ЧС определены типичные значения количества пострадавших людей и/или причиненного материального ущерба.

Иногда эту классификацию дополняют темпами развития ЧС, что представляет интерес для решения ряда задач по поддержке функционирования NGN. В частности в [65], как и в ряде других публикаций, выделяются четыре вида ЧС:

- внезапные (взрывы, аварии на транспорте, землетрясения);
- стремительные (пожары, сели, выброс ядовитых газов);
- умеренные (аварии в коммунальных системах, половодья);
- плавные (засухи, эпидемии, аварии на очистных сооружениях).

Таким образом, три классификационных признака (таксона) – количество пострадавших людей, материальный ущерб, темпы развития ЧС – свидетельствуют о многообразии возможных ситуаций. Тем не менее, для всех типов ЧС можно выделить пять характерных этапов их течения [65]:



I. Накопление отклонений от нормальных условий протекания исследуемого процесса;

II. Срабатывание "спускового механизма аварии", когда существует возможность ее предотвращения или радикальной минимизации отрицательных последствий за счет оперативного принятия всех необходимых мер;

III. Процесс чрезвычайного события с высвобождением энергии и/или воздействием других опасных факторов, затрудняющих достоверный прогноз возможных последствий;

IV. Затухание процесса ЧС;

V. Оценка последствий и ликвидация ЧС.

Приведенные выше разные способы классификации ЧС не конкретизированы с точки зрения телекоммуникационной системы общего пользования. До разработки такой классификации необходимо отметить, что для ликвидации последствий ЧС предназначен самостоятельный комплекс технических средств, входящий в систему электросвязи специального назначения. Обе системы электросвязи (общего пользования и специального назначения) взаимодействуют между собой на основании нормативного документа [164], принятого Правительством Российской Федерации. Применительно к NGN принципы взаимодействия двух системы электросвязи можно представить при помощи модели, показанной на рисунке 1.12. В левой части модели изображена ситуация до наступления ЧС. Правая часть модели отражает особенности функционирования обеих систем электросвязи после возникновения ЧС.

До возникновения ЧС необходимо периодически проверять готовность к взаимодействию двух систем электросвязи. После возникновения ЧС в зависимости от ее характера начинается процесс взаимодействия. Выполнение в NGN требований, содержащихся в [164], может быть реализовано за счет использования нескольких различных решений. Их можно свести к двум основным операциям:

- передача в пользование части ресурсов для построения, например, виртуальных сетей в интересах организаций, занимающихся ликвидацией последствий ЧС;

- присвоение трафику, определяющему эффективность работ по ликвидации последствий ЧС, специального приоритета для обслуживания.

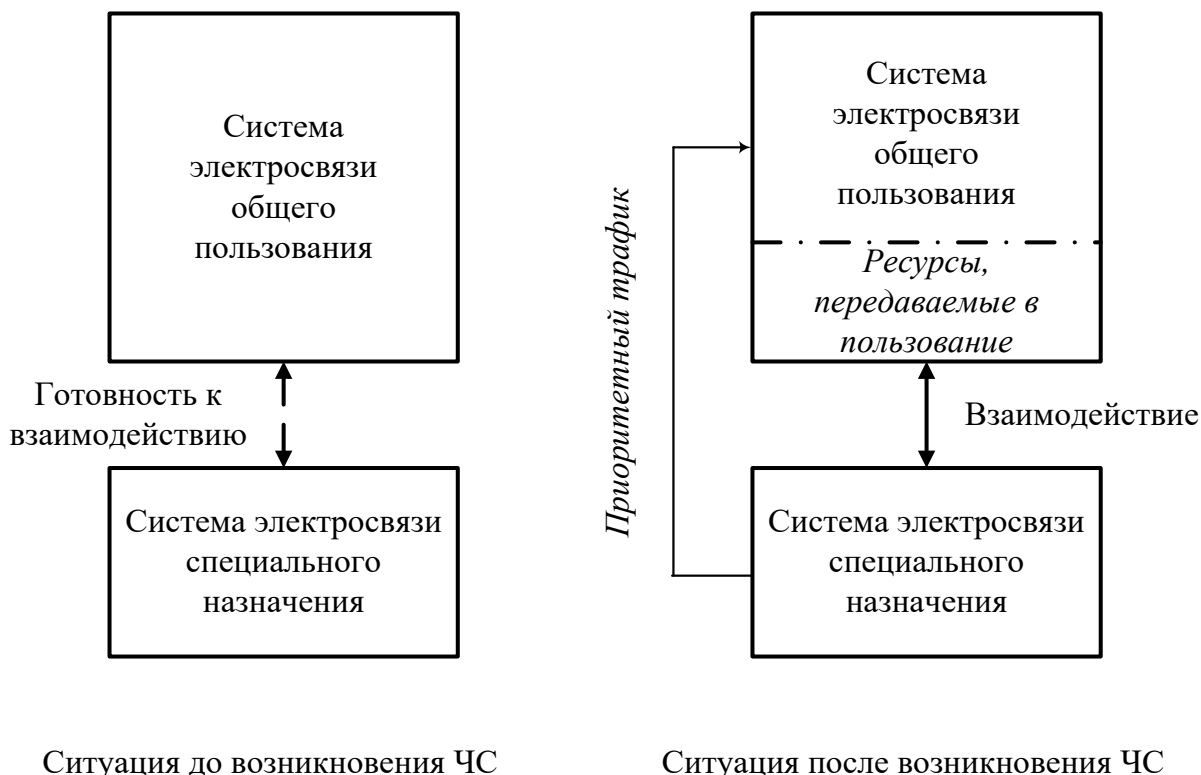


Рисунок 1.12 – Взаимодействие двух систем электросвязи

В диссертационной работе исследуется телекоммуникационная система общего пользования, реализующая свои функциональные возможности при наступлении ЧС. При этом внимание акцентируется на выборе разумного компромисса между требованиями по ликвидации последствий ЧС и процессами обслуживания трафика, который напрямую не связан с нарушениями штатной работы NGN.

Классификация последствий ЧС для телекоммуникационной системы общего пользования приведена на рисунке 1.13. Для упрощения классификации уместно использовать подход, часто применяемый в международных документах: 3–3–3. Это значит, что выделяются три таксона, в каждом из которых акцентируется внимание на трех важных аспектах. Изменения в NGN (первый таксон) подразделяются на три вида. При необходимости, каждый из них может быть детализирован за счет введения еще одного уровня в рассматриваемой классификации.



Рисунок 1.13 – Классификация ЧС по принципу 3 – 3 – 3

Во-первых, могут произойти изменения структуры сети из-за отказа одного или нескольких ее компонентов. При этом не исключено, что снижение пропускной способности транспортных средств и/или производительности устройств коммутации и обработки информации не происходит. Такая ситуация типична при отказе одного из дублированных объектов, если каждый из них может справиться с нагрузкой при заданных показателях QoS.

Во-вторых, будут наблюдаться ситуации, названные недостатком пропускной способности и/или производительности элементов сети. Это означает следующее: заметно возрос трафик, а величины пропускной способности и/или производительности, выбранные на основании проектных решений, не способны обеспечить установленные показатели QoS или хотя бы приемлемый уровень обслуживания. Термин "приемлемый уровень обслуживания" предлагается ввести в систему понятий, используемых в период до полного завершения ликвидации последствий ЧС. Соответствующие предложения обсуждаются в четвертой главе диссертационной работы.

В-третьих, могут происходить изменения двух перечисленных выше видов практически в одно и то же время. Очевидно, что такое событие будет самым неблагоприятным с точки зрения функционирования NGN, включая ее возможность выделения ресурсов для системы электросвязи специального назначения. Словосочетание "недостаток пропускной способности и/или производительности элементов сети" подчеркивает возможность возникновения ситуации, когда объем доступных ресурсов передачи, коммутации и распределения информации снижается вследствие отказов, вызванных ЧС.

Уровень иерархии сети (второй таксон) определяет те фрагменты NGN, в которых проявляются перечисленные выше явления. Сети доступа являются компонентом местной сети. По этой причине отказы в местной сети подразумевают наличие таких же процессов в сетях доступа. Иная картина складывается с междугородной сетью, учитывая протяженность территории Российской Федерации. Отказы на трассах междугородной связи из-за ЧС могут не приводить к проблемам функционирования местных сетей.

Во-первых, последствия ЧС могут затронуть только сеть доступа. На этом уровне иерархии системы электросвязи практически не используются отказоустойчивые решения [157, 165]. По этой причине большая (по численности) группа абонентов может быть отключена от сети, то есть лишиться коммутативных возможностей [139], важных при возникновении ЧС.

Во-вторых, после возникновения ЧС могут возникать проблемы с работой местных сетей. С точки зрения классификации необходимо напомнить, что в последние годы стали широко использоваться кольцевые топологии для построения транспортных сетей и географическое разнесение транзитных узлов коммутации. Эти решения обеспечивают высокие показатели надежности и живучести системы электросвязи в целом.

В-третьих, последствия ЧС могут затронуть междугородную сеть. Планы модернизации этого фрагмента системы электросвязи [143] подразумевают повышение количества направлений между УК данного уровня иерархии. По этой причине нарушение междугородных коммуникаций маловероятно. Тем не менее,

могут возникать серьезные проблемы с поддержкой нормативных показателей QoS.

Масштаб последствий (третий таксон) связан с уровнем нарушений, которые возникают в результате возникновения ЧС. Классификация для нарушений предлагается в форме трех неперекрывающихся уровней: минимальный, средний и максимальный. Представляется логичным выделение трех интервалов нарушений –  $(v_0, v_1)$ ,  $(v_2, v_3)$  и  $(v_4, v_5)$ . Физический смысл меры  $v_i$  и соответствующие численные значения для  $(i = \overline{0, 5})$  будут рассмотрены ниже.

Формально принятый способ классификации вида "3–3–3" позволяет выделить 27 состояний NGN после наступления ЧС. Использование интервальных оценок, теоретически, допускает анализ большего числа возможных ситуаций. С практической точки зрения увеличение количества состояний не имеет смысла. Более того, после проведения исследований можно отказаться от дальнейшего анализа некоторых состояний сети. В частности, для первого таксона (изменения в NGN) можно ограничиться исследованием общего случая, которому присвоен третий номер. Тогда для анализа ситуаций под номерами 1 и 2 можно ввести гипотезы об абсолютной надежности всех элементов сети и достаточности ее пропускной способности, а также производительности.

### 1.3 Анализ положительных и отрицательных свойств NGN

Почти все публикации, напрямую или косвенно связанные с концепцией NGN, представляют идею сети следующего поколения как новое направление в развитии системы электросвязи, которому присущи исключительно положительные свойства. На самом деле эту тенденцию следует рассматривать как типичную идеализацию инновационного решения. Концепции NGN, как и всем качественно

новым принципам эволюции больших и сложных систем, свойственны недостатки.

Положительные и отрицательные стороны свойства NGN будут по-разному проявляться в каждом сценарии модернизации телекоммуникационной системы. Сценарное планирование [134] часто используется для выбора рационального пути модернизации эксплуатируемых средств электросвязи. По этой причине анализ положительных и отрицательных свойств NGN можно выполнять только для некоего идеализированного сценария модернизации телекоммуникационной системы.

В качестве инструмента исследования достоинств и недостатков NGN вполне приемлем SWOT-анализ [46]. Эта аббревиатура образована из начальных букв следующих четырех слов:

- Strengths – сильные стороны;
- Weaknesses – слабые стороны;
- Opportunities – возможности;
- Threats – угрозы.

Сильные стороны концепции NGN можно представить в виде нескольких положений, сводящихся к двум тезисам. Во-первых, NGN позволяет осуществлять обмен информацией во всех основных формах (речь, данные, видео), что, безусловно, является важным фактором ее использования для эффективной ликвидации последствий ЧС. Во-вторых, NGN поддерживает широкий спектр услуг, часть которых может оказаться очень полезной при решении ряда возникающих задач.

Слабые стороны концепции NGN хорошо известны. Они связаны с потенциальным снижением качества обслуживания и проблемами уязвимости, присутствующими сложным системам с открытой распределенной архитектурой и с использованием стека протоколов TCP/IP [54, 55].

Возможности, которыми обладает NGN, следует анализировать с двух точек зрения. Во-первых, для NGN предусмотрена эффективная система управления ресурсами и обслуживаемым трафиком [51]. Однако включить это положение в пе-

речень "возможности" можно только при условии, что соответствующие аппаратно-программные средства в NGN реализованы в полном объеме. Во-вторых, создание NGN позволяет успешно использовать современные методы интеллектуального анализа данных [7], что становится важным инструментом для оперативной ликвидации последствий ЧС, а также результаты постоянного наблюдения за трафиком [128, 133].

Угрозы, возникающие при переходе к NGN, следует считать следствием слабых сторон данной концепции. В первую очередь, необходимо помнить о потенциальном снижении надежности и живучести [147, 166]. Существенной угрозой становится также информационная безопасность [59, 60].

Перечисленные четыре показателя можно оценивать качественно, не прибегая к математическим методам. Такой подход приемлем, так как для некоторых показателей не существует ни общепринятых норм, ни методик вычислений необходимых характеристик. С другой стороны, для наглядного представления результатов SWOT-анализа можно рекомендовать подход, который включает пять основных этапов.

I. Для каждого  $i$  – го показателя ( $i = \overline{1, 4}$ ) определяется набор значений  $h_{ij}$ . Индекс  $j$  идентифицирует характеристику, существенную для  $i$  – го показателя. Для любого  $i$  – го показателя известна величина  $n(i)$ , равная количеству рассматриваемых характеристик.

II. Производится численная оценка значений  $h_{ij}$  за счет опроса экспертов или иным способом. Далее определяются средние значения этих оценок  $h_{ij}^{(1)}$  и соответствующие среднеквадратические отклонения  $\sigma_{ij}$ .

III. Оценки вида  $h_{ij}^{(1)}$  пересчитываются в величины  $g_{ij}$ , удовлетворяющие неравенству  $0 \leq g_{ij} \leq 1$ . Значение "1" соответствует лучшему случаю для решения поставленной задачи. Худший случай – нулевой уровень величины  $g_{ij}$ .

IV. Вычисляются четыре показателя  $G_i$  по правилу расчета длины вектора [41]:

$$G_i = \frac{1}{n(i)} \sqrt{\sum_{j=1}^{n(i)} (g_{ij})^2}. \quad (1.4)$$

Очевидно, что для всех четырех величин  $G_i$  справедливо неравенство, приведенное выше –  $0 \leq G_i \leq 1$ .

V. В круге с единичным радиусом под углом  $90^\circ$  друг относительно друга наносятся величины  $G_i$ . Их вершины соединяются друг с другом, в результате чего образуется четырехугольник с площадью  $Z$ . При близости площади  $Z$  к единице можно утверждать, что в результате SWOT-анализа выявлен следующий факт: исследуемому объекту (или процессу) свойственны сильные стороны и большие потенциальные возможности, а не существенные слабые стороны и минимальные угрозы.

Пример построения четырехугольников для двух разных проектов модернизации ТфОП в направлении NGN (I и II) показан на рисунке 1.14. Величины  $G_i$  выбраны произвольно.

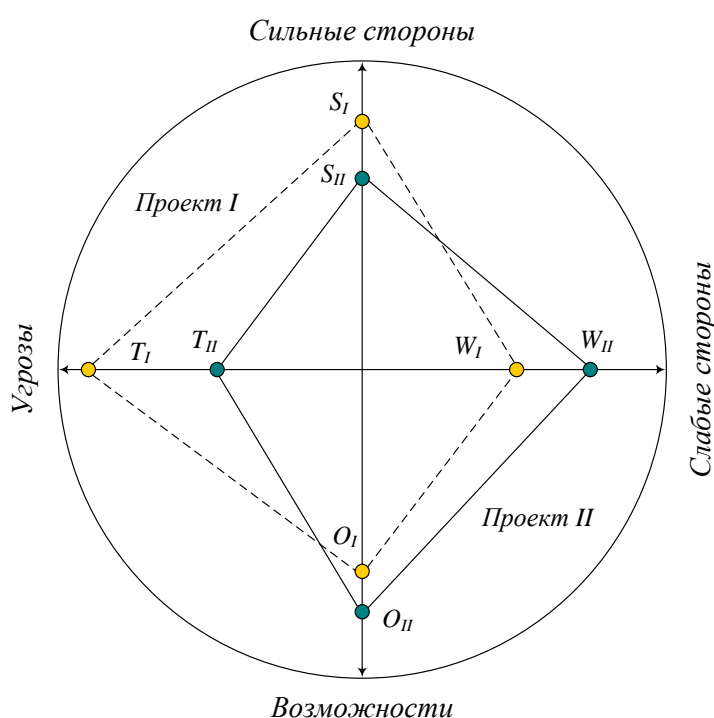


Рисунок 1.14 – Пример использования SWOT-анализа. Точечные оценки



Пусть площадь первого четырехугольника  $Z_I$  больше, чем площадь второго четырехугольника  $Z_{II}$ . Неравенство  $Z_I > Z_{II}$  следует рассматривать лишь как информацию для лица, принимающего решение. Данное утверждение объясняется двумя обстоятельствами. Во-первых, всем векторам присвоен одинаковый вес. Это не всегда уместно. Во-вторых, как было упомянуто выше, оценкам  $h_{ij}$  свойственны колебания, определяемые при помощи среднеквадратических отклонений  $\sigma_{ij}$ . Если вместо точечных оценок  $h_{ij}$  ввести интервальные оценки вида  $h_{ij}^{(1)} \pm \sigma_{ij}$ , то рассматриваемый пример может дать совершенно иное представление.

На рисунке 1.15 показана трансформация предшествующей иллюстрации при замене точечных оценок интервальными. Линии, соединяющие значения  $G_i$ , проведены между одноименными оценками (верхними *max* и нижними *min*). Верхняя оценка образуется добавлением среднеквадратического отклонения, а нижняя – его вычитанием.

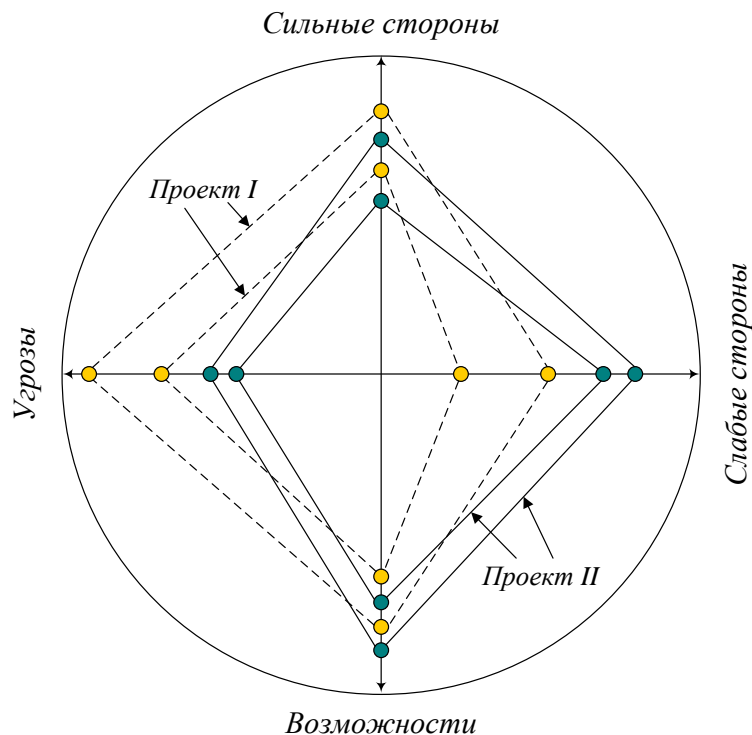


Рисунок 1.15 – Пример использования SWOT-анализа. Интервальные оценки

Если рассчитать для верхних и нижних оценок величины площадей  $Z_I^{min}$ ,  $Z_I^{max}$ ,  $Z_{II}^{min}$  и  $Z_{II}^{max}$ , то можно получить, например, неравенство такого рода:  $Z_{II}^{min} < Z_I^{min} < Z_I^{max} < Z_{II}^{max}$ . В подобных случаях сформулировать предпочтения вида  $Z_I \succ Z_{II}$  или  $Z_{II} \succ Z_I$  не представляется возможным, что усложняет принятие решения и, в то же время, предъявляет более жесткие требования к информации, которая связана с обоснованием решения.

Связка "лицо, обосновывающее решение – лицо, принимающее решение" часто используется при анализе проектов [23] в тех случаях, когда экономико-математические методы не могут быть использованы в силу объективных либо субъективных причин.

Примеры применения SWOT-анализа, приведенные в этом параграфе, связаны, скорее, с проектами по реализации NGN, чем с одноименной концепцией. Более того, при проведении SWOT-анализа основное внимание фактически акцентировалось на процессах функционирования NGN в период ликвидации последствий ЧС. Этот период занимает небольшое время по сравнению с длительностью штатных условий работы системы электросвязи. Тем не менее, он очень важен с точки зрения тех задач, которые возложены на современную систему электросвязи [227].

#### **1.4 Анализ работ, посвященных принципам функционирования сетей электросвязи в ЧС**

Совокупность опубликованных работ, посвященных принципам функционирования сетей связи в период действия ЧС, логично разделить на три группы в соответствии с теми целями, которые были поставлены при их выполнении:

- улучшение основных показателей работы телекоммуникационной системы с учетом сложившихся обстоятельств за счет организационно-технических решений;
- обеспечение надежности работы телекоммуникационной системы при отказах ее элементов;
- поддержка лучших показателей качества обслуживания для различных видов трафика.

До выполнения анализа известных работ следует изложить ряд соображений, касающихся исторических аспектов функционирования сетей электросвязи в период действия ЧС и статистических данных о масштабных катастрофах.

Телеграфия стала первым видом электросвязи. И первая сеть связи общего пользования была телеграфной. Широкое использование телеграфных сообщений в системе управления государством стимулировало интерес к тем возможностям, которые характерны для ЧС и некоторых других нештатных ситуаций. Разработка системных принципов построения сетей телеграфной связи [40, 175] и других руководящих документов отрасли проводилась с учетом требований к телекоммуникационной системе в период действия ЧС. Следует отметить, что система телеграфной связи была признана надежным и эффективным средством решения задач по обмену важной информацией. Данное утверждение следует рассматривать с учетом тех функциональных возможностей, которые свойственны телеграфной связи.

Передача информации, относящейся к оповещению, исторически была возложена на систему звукового вещания [63]. В настоящее время эти функции в сетях звукового и телевизионного вещания сохраняются в Москве и в Санкт-Петербурге. Правда, в последние годы, в соответствии с Указом Президента России № 1522 от 13 ноября 2012 г. [197] началось создание перспективной системы экстренного оповещения. В диссертационной работе система оповещения рассматривается, в основном, как средство снижения трафика в NGN.

Появление сетей телефонной связи позволило значительно расширить перечень услуг, которые особо важны в период действия ЧС [56, 156]. В первую оче-

редь, этот процесс выразился в организации связи с экстренными оперативными службами по двухзначным номерам 01, 02, 03 и 04 [156]. С другой стороны, некоторые функциональные возможности, присущие сетям телеграфной связи, в ТфОП отсутствуют. Типичный пример – услуги циркулярной и групповой связи, для поддержки которых необходима установка дополнительных аппаратно-программных средств [224].

Влияние, которое оказывают ЧС различного рода на телекоммуникационную систему, можно рассматривать как следствие воздействия внешних факторов. Особо важны частота их появления и масштабы последствий. Эти две характеристики подчеркивают актуальность работ, направленных на превентивную подготовку сетей электросвязи к функционированию, которая ориентирована на ликвидацию ожидаемых последствий ЧС. Безусловно, следует учитывать и внутренние факторы, обусловленные принципами построения телекоммуникационной системы и основными направлениями ее эволюции.

Проявления большинства ЧС регистрируются, что позволяет собрать статистику и представить ее в виде функции  $N(t)$ . Она характеризует количество ЧС за период времени  $t$ , принятый в большинстве публикаций равным календарному году. Величина  $N(t)$  обычно равна сумме  $m$  слагаемых  $n_i(t)$ , каждое из которых определяет количество ЧС  $i$  – го рода за период времени  $t$ :

$$N(t) = \sum_{i=1}^m n_i(t). \quad (1.5)$$

Значение  $m$  определяется классификационными признаками ЧС. Их обычно выбирают с учетом международных и национальных стандартов по безопасности. Функция  $N(t)$ , приведенная в отчете компании Munich Re Group [259], которая считается одним из лидеров мирового рынка перестрахования, показана на рисунке 1.16.

Рассматриваемая функция построена в виде гистограммы, в которой каждый столбик представляет собой сумму из четырех слагаемых, соответствующих причине ЧС. В данном случае  $m = 4$ . Сплошной линией изображен тренд измене-

ния количества ЧС за тридцать лет. Этот тренд согласуется с рядом прогностических оценок, которые свидетельствуют об увеличении как количества ЧС, так и их масштабов [90].

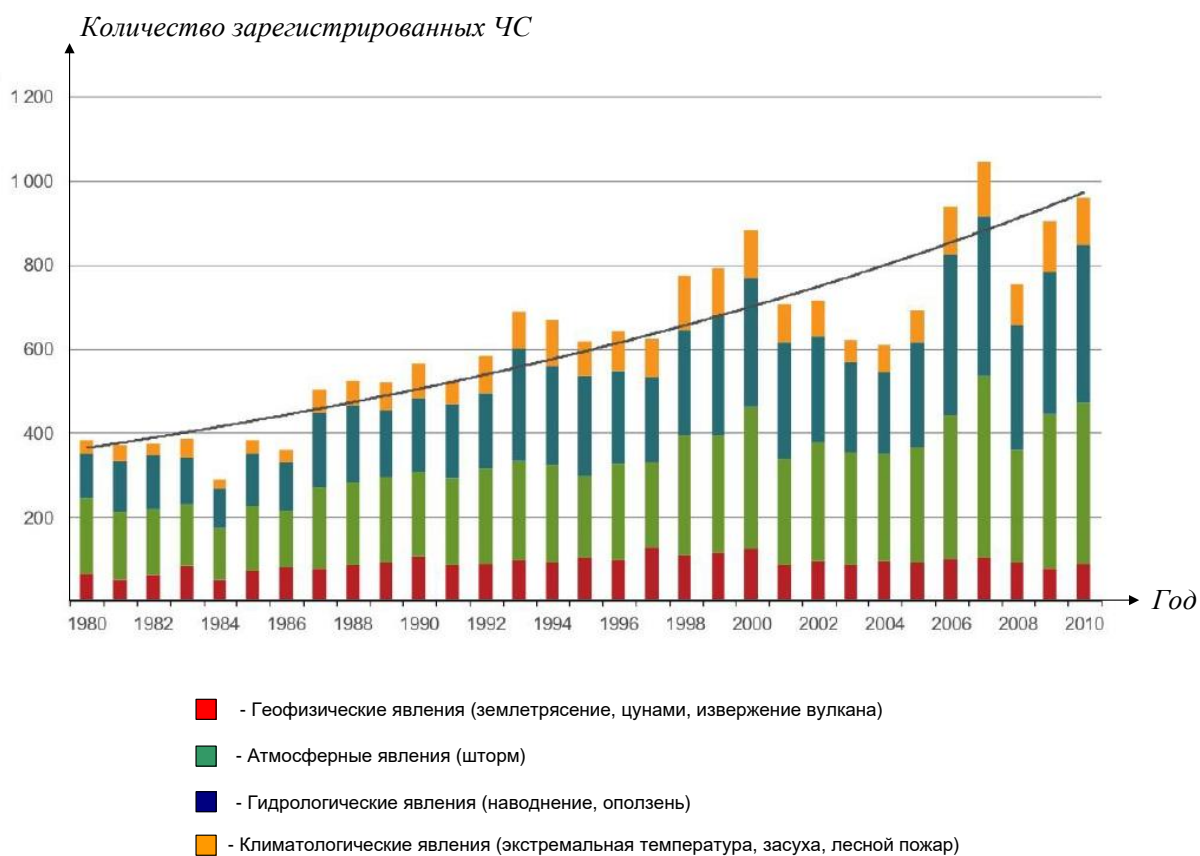


Рисунок 1.16 – Количество ЧС, зарегистрированных за тридцать лет

Выявленный тренд свидетельствует, что среднегодовое количество ЧС, обусловленных природными явлениями, непрерывно возрастает. К сожалению, аналогичный характер присущ и техногенным катастрофам. Из пяти тысяч самых крупных аварий не менее 90% произошло в промышленно развитых странах [192]. В разные годы соотношение между количеством природных и техногенных катастроф меняется, что следует из статистических данных, приведенных в таблице 1.1. Эти данные касаются зарегистрированных катастроф во всем мире в период с 2007 по 2010 годы [192].

Данные, содержащиеся в таблице 1.1, позволяют сделать вывод о возможности существенных различий как в частоте катастроф за год, так и в масштабе

последствий. Применительно к сети электросвязи данный вывод может быть интерпретирован следующим образом:

- изменение характера трафика, обслуживаемого с момента возникновения ЧС до ликвидации ее последствий, может быть весьма существенным;
- количество элементов телекоммуникационной системы, отказавших вследствие возникновения ЧС, может варьироваться в широких пределах.

Таблица 1.1 – Статистика природных и техногенных катастроф

Год	Количество катастроф:			Количество погибших	Материальный ущерб, \$ млрд.
	природных	техногенных	всего		
2007	142	193	335	20000	70
2008	137	174	311	240500	269
2009	224	21	245	15000	68
2010	950	2	952	304000	222

Среди публикаций, направленных на улучшение основных показателей работы телекоммуникационной системы с учетом сложившихся обстоятельств за счет организационно-технических решений, следует выделить результаты исследований по применению Системы-112 [18, 34] для доступа к экстренным оперативным службам. Система-112 должна быть создана во всех странах Европы. Подчеркивая важность этого проекта, Евросоюз установил "День Системы-112", который ежегодно отмечается 11 февраля. На сайте <http://www.112foundation.eu> размещается актуальная информация о развитии Систем-112 в странах Европы. Следует отметить, что все отраслевые российские журналы постоянно публикуют работы, посвященные основным аспектам создания и развития Системы-112.

Принципы создания и развития Системы-112 схожи с аналогичными положениями в североамериканской Службе спасения [224], известной по номеру доступа "911". Ряд интересных соображений о дальнейшем развитии связи с экстренными оперативными службами, независимо от номера доступа, изложены,

например, в монографиях [251, 256]. Вопросы, обсуждаемые в этих монографиях, напрямую связаны с использованием стека протоколов TCP/IP в сетях электросвязи и переходом к NGN.

Проблемам обеспечения устойчивой работы сетей электросвязи при отказах ее элементов посвящен ряд монографий [32, 50, 62, 73, 157, 165] и статей в отраслевых журналах [30, 147, 149, 194, 195, 216, 250]. Изложенные результаты имеют теоретическое значение, но часто не учитывают реальную ситуацию с построением и модернизацией сетей электросвязи. На рисунке 1.17 изображена цепочка изменений, вносимых в гипотетический проект развития сети электросвязи. Подобные изменения обусловлены совокупностью объективных и субъективных факторов, часть которых невозможно учесть заранее.

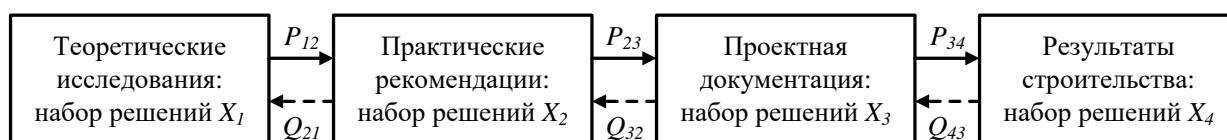


Рисунок 1.17 – Изменения решений по развитию сети электросвязи

В результате теоретических исследований формируется набор решений, обозначенный в рассматриваемой цепочке как  $X_1$ . На этапе составления практических рекомендаций в набор  $X_1$  вносятся изменения, которые можно рассматривать как искажения. Этот факт отображается вероятностью  $P_{12}$ , которая служит мерой различия между наборами  $X_1$  и  $X_2$ . Эффективность информации, которая передается между первым и вторым блоком рассматриваемой модели по петле обратной связи, зачастую бывает очень низкой. Эта эффективность оценивается вероятностью  $Q_{21}$ .

При разработке проектной документации формируется набор решений  $X_3$ . Он отличен от наборов  $X_1$  и  $X_2$ , что оценивается вероятностями  $P_{12}$  и  $P_{23}$  соответственно. Эффективность информации в петле обратной связи между вторым и третьим блоками предложенной модели также не столь высока. Она выражается через вероятность  $Q_{32}$ .

Характеристики комплекса технических средств, который предстоит эксплуатировать Оператору связи, определяется набором  $X_4$ . Очевидно, что его отличие от набора  $X_1$  будет весьма существенным. Замечания относительно вероятностей  $P_{34}$  и  $Q_{43}$  совпадают с теми утверждениями, которые высказаны выше об аналогичных величинах, отличающихся только подстрочными индексами.

Практические примеры, иллюстрирующие действие рассматриваемой цепочки, изложены во второй главе диссертационной работы. Они, в основном, связаны с ограничениями на построение кольцевых топологий для повышения надежности телекоммуникационной системы. Модели, исследуемые в диссертационной работе, основаны на наборе решений, обозначенных как  $X_4$ , чтобы получить результаты, которые ориентированы на решение практических задач.

Результаты исследований, направленных на поддержку заданных показателей качества обслуживания для различных видов трафика, основаны на фундаментальных монографиях по теории телетрафика. К их числу следует отнести ряд отечественных [3, 8, 10, 27, 32, 133, 191, 202, 209] и зарубежных [45, 69, 70, 178, 217, 229] изданий. Для исследования моделей телетрафика, адекватно отображающих процессы функционирования NGN и ее элементов, большой интерес представляют статьи, посвященные следующим вопросам:

- характеристикам выходящих потоков заявок [88, 213, 218];
- методам расчета СМО с произвольным характером входящего потока заявок [10, 185, 240, 241, 253];
- алгоритмам управления входящими потоками заявок при перегрузке одного или более элементов сети [1, 49, 177, 203].

Кроме источников, перечисленных в этом разделе, в диссертационной работе использованы и другие публикации. Ссылки на другие источники приведены в следующих главах диссертационной работы.

Следует подчеркнуть еще два обстоятельства. Во-первых, принципы взаимодействия двух систем электросвязи, показанные на рисунке 1.12, пока остаются декларативными. Тем не менее, при проведении диссертационного исследования



предполагалось, что такое взаимодействие будет реализовано в ближайшее время. Во-вторых, диссертация направлена на разработку принципов функционирования NGN в период действия ЧС, а не на решение задач информационной поддержки восстановительных работ. Тем не менее, аспекты информационной поддержки восстановительных работ все же рассматриваются, но с точки зрения их влияния на параметры мультисервисного трафика, обслуживаемого NGN. Подобный подход отражает междисциплинарный подход [37, 141], который многими специалистами считается перспективным для исследования больших и сложных систем.

### **1.5 Выводы по главе 1**

1. Анализ характеристик телекоммуникационной системы в период действия ЧС должен проводиться с учетом направлений ее эволюции в обозримой перспективе. Ведущей тенденцией долгосрочного развития телекоммуникационной системы стал переход к сети связи следующего поколения, более известной в профессиональном сообществе по аббревиатуре NGN. Важную роль продолжают играть процессы интеграции, конвергенции и консолидации, присущие телекоммуникационной системе.

2. Предложенная модель телекоммуникационной системы в виде "черного ящика" позволяет исследовать две важные группы характеристик NGN в период действия ЧС. Состав первой группы характеристик определяется процессами отказов и восстановлений элементов, формирующих NGN. Ко второй группе характеристик относятся все атрибуты телекоммуникационной системы, влияющие на качество обслуживания мультисервисного трафика.

3. До ликвидации последствий ЧС следует ввести временные нормы на показатели качества обслуживания. Эти нормы должны базироваться на приемлемом уровне поддержки телекоммуникационных и информационных услуг. Самым эффективным средством обеспечения временных норм на показатели качества об-

служивания становится отказ от поддержки некоторых видов услуг, которые не связаны с ликвидацией последствий ЧС.

4. Классификация состояний телекоммуникационной системы после возникновения ЧС может быть выполнена на основании правила  $3 \times 3 \times 3$ . Оно подразумевает выделение трех основных классификационных признаков, для каждого из которых определяется три важнейших (для периода действия ЧС) состояния телекоммуникационной системы. В результате максимальное количество ситуаций, которое следует анализировать для принятия решений по дальнейшему функционированию NGN, составляет 27.

5. Концепции NGN присущи не только положительные, но и отрицательные стороны. Для всестороннего исследования возможных сценариев функционирования NGN следует использовать SWOT-анализ. Он позволяет выявить сильные и слабые стороны концепции NGN, а также потенциальные возможности по улучшению обслуживания трафика до ликвидации последствий ЧС и возможные угрозы. Разные принципы перехода к NGN, а также альтернативные стратегии по управлению ресурсами телекоммуникационной системы удобно оценивать за счет построения многоугольников, вписанных в окружность единичного радиуса, и сравнения их площадей. Это сравнение может быть основано на точечных и интервальных оценках исследуемых характеристик.

6. В цепочку от теоретических идей по построению NGN до их воплощения вносится ряд изменений объективного и субъективного характера на этапах составления практических рекомендаций по построению сети электросвязи, проектирования и строительства. Для исследования принципов функционирования NGN в период действия ЧС следует использовать математические модели, описывающие телекоммуникационную систему, которая была создана в результате строительства всего комплекса технических средств.

7. Анализ статистических данных о количестве ЧС и масштабах их последствий, а также соответствующих прогнозов показывает, что потенциальные угрозы постоянно возрастают. Это отражается на устойчивости функционирования

телекоммуникационной системы и требует проведения превентивных мер по подготовке технических средств к работе в период действия ЧС.

## **2. Характеристики надежности и живучести сети связи следующего поколения в чрезвычайных ситуациях**

### **2.1 Математические модели и постановка решаемых задач**

Надежность и живучесть NGN, как и любой другой сети электросвязи, определяются множеством факторов. При возникновении ЧС следует выделить три основных вида событий:

- все УК и соединяющие их тракты обмена IP-пакетами находятся в состоянии работоспособности;
- часть УК и/или трактов обмена IP-пакетами переходит в состояние отказа;
- телекоммуникационная система в результате сильных разрушающих воздействий полностью перешла в состояние отказа.

События первого и третьего вида в этой главе диссертационной работы не рассматриваются. Для событий первого вида актуальны методы по обеспечению приемлемого качества обслуживания мультисервисного трафика. Им посвящены третья и четвертая главы диссертационной работы. При наступлении событий третьего вида телекоммуникационные и информационные услуги для целей ликвидации последствий ЧС, как показано на рисунке 1.12, должны поддерживаться сетями электросвязи специального назначения. События третьего вида на практике в Российской Федерации не зафиксированы, то есть их можно рассматривать как экстраординарные.

Согласно рекомендации МСЭ-Т E.800 [231] показатели надежности телекоммуникационной системы входят в перечень норм, которые установлены для показателей качества – QoS. В отечественной научной и технической литературе характеристики надежности и живучести обычно являются предметом самостоя-

тельного исследования. Для анализа процессов в NGN после возникновения ЧС такой подход представляется тем более оправданным, что никакого отрыва понятия "надежность" от терминов, характерных для категории "качества", не образуется.

Для исследования влияния разрушающих воздействий ЧС на телекоммуникационную систему следует проанализировать структуру NGN. При разработке модели NGN используется методологический подход, который показан на рисунке 2.1 [144]. Сначала тщательно формируется содержательная модель исследуемой сети. Затем она формализуется в объект, который может быть исследован при помощи математических методов. Результаты исследования должны быть представлены в форме практических рекомендаций, важных для ликвидации последствий ЧС различной природы.



Рисунок 2.1 – Методология разработки модели для анализа структуры NGN

Содержательная модель составляется с учетом цепочки, показанной на рисунке 1.17 ("Изменения в проекте развития сети электросвязи"). Это значит, что в модели учтены основные особенности телекоммуникационной системы, реализованной в результате ее строительства, а не на базе теоретических предложений, которые определяют ее идеализированные характеристики.

Математической моделью сети электросвязи, удобной для исследования ее структурных характеристик, исторически стал граф [153, 200]. Этот вид математической модели сети электросвязи остается эффективным и для решения многих новых задач. Анализ показателей надежности и живучести телекоммуникацион-

ной системы в условиях ЧС можно проводить и на моделях, которые называются случайными графами [173]. В последние годы в качестве математических моделей для исследуемых моделей стали активно использоваться гиперсети [166, 167]. В этой главе диссертационной работы используются все три вида моделей, описывающих структуру сети электросвязи.

Пусть в графе  $G(a,b)$ , который служит моделью эксплуатируемой NGN, суммарное количество вершин и ребер, определенных проектным решением, равно  $M$  и  $N$  соответственно. Для ряда ЧС величины количества ребер  $a_i$  и вершин  $b_{ij}$  следует рассматривать как случайные величины. Тогда случайные величины  $a(k)$  и  $b(k)$ , определяемые количеством работоспособных вершин и ребер для ЧС  $k$ -го вида, определены на конечных интервалах. Этот факт может быть представлен двумя неравенствами:

$$0 \leq a(k) \leq M, \quad 0 \leq b(k) \leq N. \quad (2.1)$$

Случайные величины  $a(k)$  и  $b(k)$  принимают целочисленные положительные значения. Они заданы на конечном интервале с ФР  $F_k(a)$  и  $F_k(b)$ . Практический интерес связан с распределениями, имеющими конечные значения математических ожиданий  $a^{(1)}(k)$  и  $b^{(1)}(k)$ , а также дисперсий  $D_a(k)$  и  $D_b(k)$ . Это утверждение относится и к моментам обеих случайных величин более высоких порядков. Справедливость введенных допущений следует из преобразований Лапласа-Стилтьеса [44, 47]  $\varphi_k(a,s)$  и  $\varphi_k(b,s)$ . Их оригиналы представляют собой ступенчатые функции с приращениями  $p_i(a)$  и  $p_i(b)$  соответственно:

$$\varphi_k(a,s) = \sum_{i=0}^M p_i(a) e^{-is}, \quad \varphi_k(b,s) = \sum_{i=0}^N p_i(b) e^{-is}. \quad (2.2)$$

Из соотношений (2.2) видно, что существуют производные любого порядка от преобразований  $\varphi_k(a,s)$  и  $\varphi_k(b,s)$ . По известным правилам [44, 47] могут быть вычислены начальные моменты исследуемых случайных величин любого порядка.

Две структуры графа показаны на рисунке 2.2. В левой части модели приведена структура сети, которая построена на основе проектных решений. Она представлена в виде графа из семи вершин и одиннадцати ребер. Правая часть модели иллюстрирует подграф, в состав которого входят пять вершин и четыре ребра. Причины отказа остальных вершин и ребер для рассматриваемого примера не существенны.

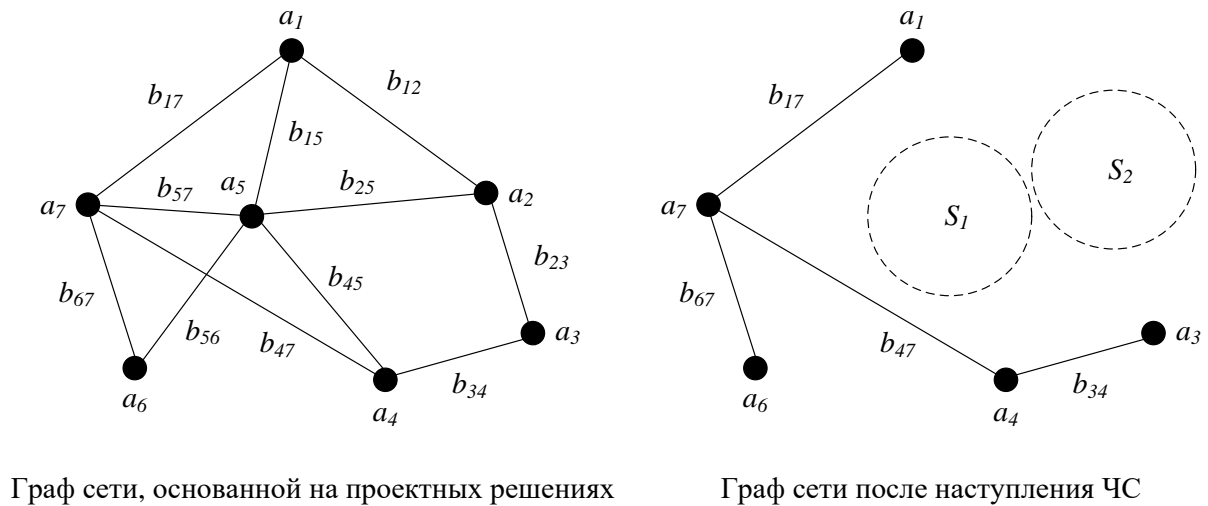
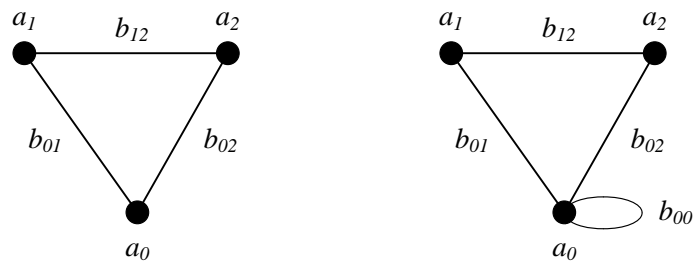


Рисунок 2.2 – Модель NGN в виде случайного графа

Для рассматриваемой модели, предполагается, что отказы произошли из-за наступления ЧС. Пунктирными линиями показаны границы территорий  $S_1$  и  $S_2$ , в пределах которых, без использования ряда специальных мер, все виды услуг недоступны. Эти меры, с точки зрения модели, заключаются в добавлении хотя бы одной вершины и/или одного ребра. На практике необходимо использовать резервное оборудование для временной организации связи.

В большинстве ЧС причиной формирования территорий вида  $S_1$  и  $S_2$  становятся длительные перерывы в подаче напряжения 220/380 В переменного тока. Подобные явления относятся к внешним причинам отказов в обслуживании. Из внутренних причин, приводящих к отказам в сети электросвязи, которая модернизируется на основании концепции NGN, следует выделить нарушение функций управления телекоммуникационной системой, которые возложены на контроллер транспортных шлюзов. Он более известен как SSW (SoftSwitch). Оборудование

SSW – это сложный и дорогой комплекс аппаратно-программных средств. По этой причине в субъекте Российской Федерации обычно устанавливается только два таких комплекса. Каждый SSW способен выполнять функции управления всей телекоммуникационной системой в границах территории субъекта Российской Федерации. Если все УК представить в виде вершины графа  $a_0$ , то модель, которая отражает влияние оборудования SSW на надежность телекоммуникационной системы, может быть представлена в виде графа, показанного в левой части рисунка 2.3. Вершины графа  $a_1$  и  $a_2$  соответствуют оборудованию SSW, расположенному на двух географически разнесенных площадках. Очевидно, что для успешного функционирования NGN необходимо соблюдение двух условий. Первое условие – работоспособность хотя бы одного SSW (наличие, по крайней мере, одной из вершин –  $a_1$  или  $a_2$ ). Второе условие – возможность передачи управляющей информации от работающего SSW во все УК сети электросвязи (например, для вершины  $a_1$  сохранение либо ребра  $b_{01}$ , либо ребер  $b_{12}$  и  $b_{02}$ ).



а) Первая модель NGN

б) Вторая модель NGN

Рисунок 2.3 – Модель, иллюстрирующая влияние оборудования SSW

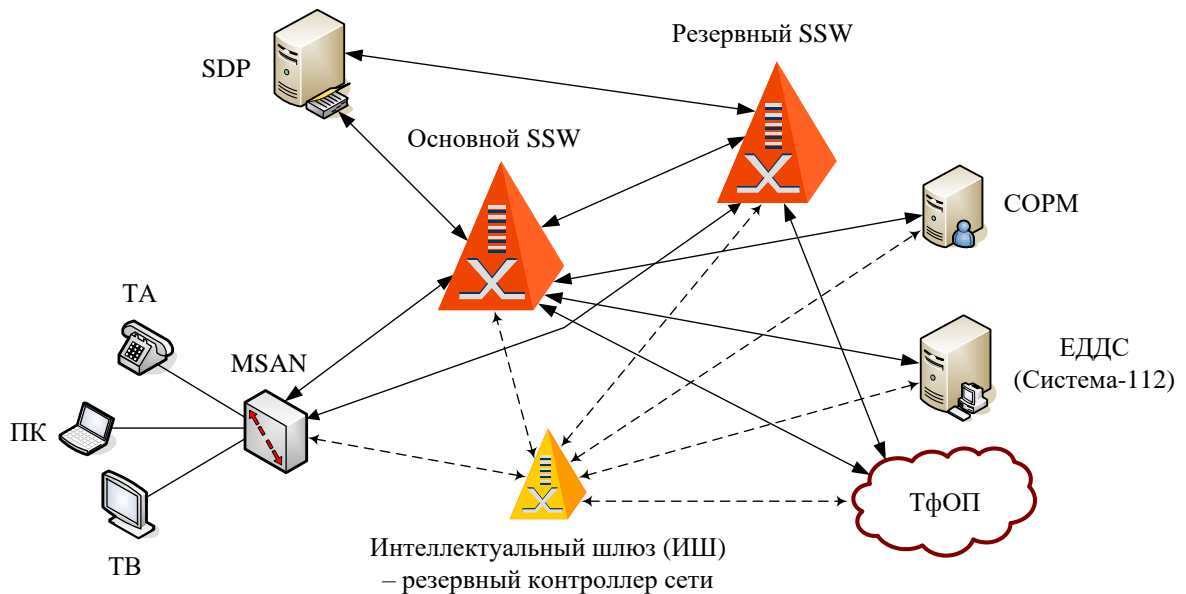
Резервирование оборудования SSW не всегда сопровождается аналогичными мерами по обеспечению надежности транспортных ресурсов в силу исторически сложившейся практики проектирования и построения кабельных линий связи. Иногда встречаются два формально разных направления связи, но на ряде участков сети электросвязи используемые линейные сооружения проложены совместно. По этой причине наличие двух коммутаторов SSW не гарантирует надежное



функционирование телекоммуникационной системы субъекта Российской Федерации в целом.

Для повышения надежности сети электросвязи предложено ввести в ее состав дополнительные аппаратно-программные средства, названные Интеллектуальным шлюзом (ИШ). Основная функция этого шлюза – выполнение функций управления фрагментом телекоммуникационной системы до восстановления связи хотя бы с одним из коммутаторов SSW. В этом случае модель, рассмотренная выше, меняется. Она показана в правой части рисунка 2.3. Повышение надежности NGN отображается появлением петли  $b_{00}$ .

Модель сети электросвязи, в которой используется ИШ, показана на рисунке 2.4. Пунктирные линии, связывающие ИШ с другими элементами сети электросвязи, подчеркивают то обстоятельство, что в штатных условиях функционирования телекоммуникационной системы его ресурсы могут не использоваться. Практический опыт применения ИШ показал, что он весьма эффективен для обслуживания некоторых видов сигнального трафика в сетях класса NGN.



SSW – программный коммутатор SoftSwitch, SDP – платформа предоставления услуг, COPM – система оперативно-розыскных мероприятий, ЕДДС – единая дежурно-диспетчерская служба, MSAN – мультисервисный узел доступа, ТА – телефонный аппарат, ПК – персональный компьютер, ТВ – телевизионный приемник, ТфОП – телефонная сеть общего пользования.

Рисунок 2.4 – Фрагмент NGN с использованием Интеллектуального шлюза

Оценки характеристик сети электросвязи класса NGN можно получить за счет использования моделей в виде графов. Более перспективным подходом считается применение моделей в виде гиперсети. Она позволяет проводить анализ многих характеристик, необходимых для решения задач проектирования и эксплуатации современных сетей электросвязи. Рисунок 2.5 иллюстрирует суть подхода к построению гиперсети. Рассматриваемая модель приведена в [220]. Она представляет собой двухслойную (двухуровневую) гиперсеть.

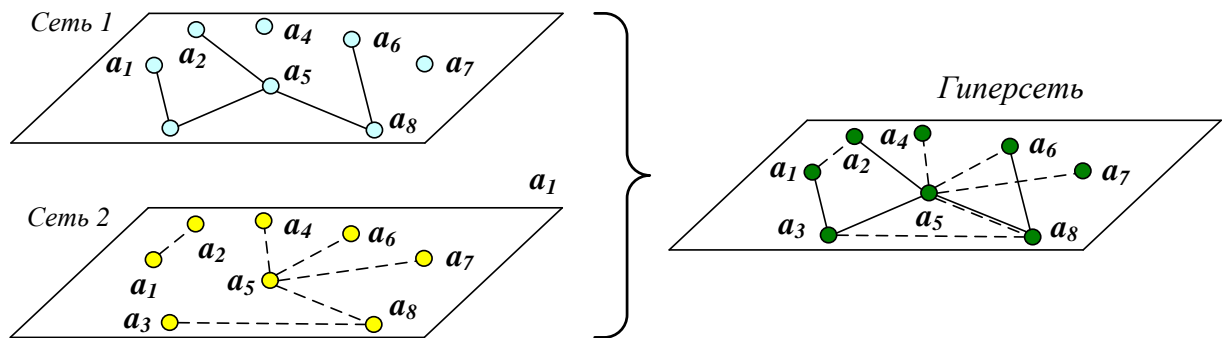


Рисунок 2.5 – Построение двухслойной гиперсети

Гиперсеть  $S = (X, V, R, P, F, W)$  представляет собой математическую модель, которая описывает структуру сети электросвязи как единого объекта. Эта модель включает следующие атрибуты [167 – 169]:

- $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – множество вершин.
- $V = (v_1, v_2, \dots, v_g)$  – множество ветвей.
- $R = (r_1, r_2, \dots, r_m)$  – множество ребер.
- $P: V \rightarrow 2^X$  – отображение, сопоставляющее каждому элементу  $v \in V$  множества  $P(v) \subseteq X$  его вершин. Это означает, что отображение  $P$  определяет гиперграф транспортной сети (transport network) –  $TN = (X, V, P)$ .
- $F: R \rightarrow 2_{TN}^V$  – отображение, сопоставляющее каждому элементу  $r \in R$  множества  $F(r)$  ветвей. Семейство подмножеств  $2_{TN}^V$  содержит такие

подмножества, ветви которых составляют связную часть гиперграфа  $TN$ .  
 Отображение  $F$  определяет гиперграф  $FN = (V, R, F)$ .

- $W : r \rightarrow 2^{P(F(r))} \forall r \in R$  – отображение, сопоставляющее каждому элементу  $r \in R$  подмножество  $W(r) \subseteq P(F(r))$  его вершин. Здесь  $P(F(r))$  представляет собой множество вершин в коммутируемой сети (switched network)  $SN$ , которые инцидентны ветвям  $F(r) \subseteq V$ . Отображение  $W$  определяет гиперграф  $SN(X, R, W)$ .

Выбор вида модели, описывающей структуру NGN и ее фрагментов, определяется характером поставленной задачи и используемым методом решения. Соображения, изложенные выше, позволяют, в принципе, свести все модели к гиперсети, как к самой общей форме представления сети электросвязи. Такой подход правомерен, но зачастую усложняет математическую модель. По этой причине в диссертационной работе используются математические модели в виде графа, гиперграфа, случайного графа и гиперсети сообразно поставленной задаче.

Для разработки принципов функционирования NGN в период действия ЧС необходимо решить следующие задачи:

- выбрать показатели надежности, существенные с точки зрения поддержки основных телекоммуникационных и информационных услуг;
- оценить структурные характеристики, необходимые для разработки превентивных методов повышения надежности телекоммуникационной системы;
- проанализировать типичные состояния телекоммуникационной системы при разрушающих воздействиях разного рода;
- разработать методику применения комплекса резервных технических средств, который предназначен для восстановления целостности телекоммуникационной системы.

Решению этих задач посвящены четыре следующих раздела данной главы диссертационной работы. Кроме этих задач в разделах 2.2 – 2.5 изложены сооб-

ражения по вопросам, прямо или косвенно касающимся надежности и живучести телекоммуникационной системы.

## 2.2 Выбор показателей надежности в условиях ЧС

В монографиях по теории надежности используется ряд общепринятых показателей [157]. Для исследования поведения сетей электросвязи в условиях ЧС можно использовать ограниченный набор показателей надежности. При этом некоторые показатели рассматриваются с иной точки зрения. Характерный пример – график интенсивности отказов  $\lambda(t)$ , приведенный на рисунке 2.6. Предполагается, что ЧС возникает в границах периода  $(0, t_1]$  по оси абсцисс. На практике ЧС может произойти на отрезках времени  $(t_1, t_2]$  и  $(t_2, \infty)$ , что – для рассматриваемых ниже показателей – не столь существенно. С точки зрения функционирования NGN отказы в ЧС можно считать внезапными.

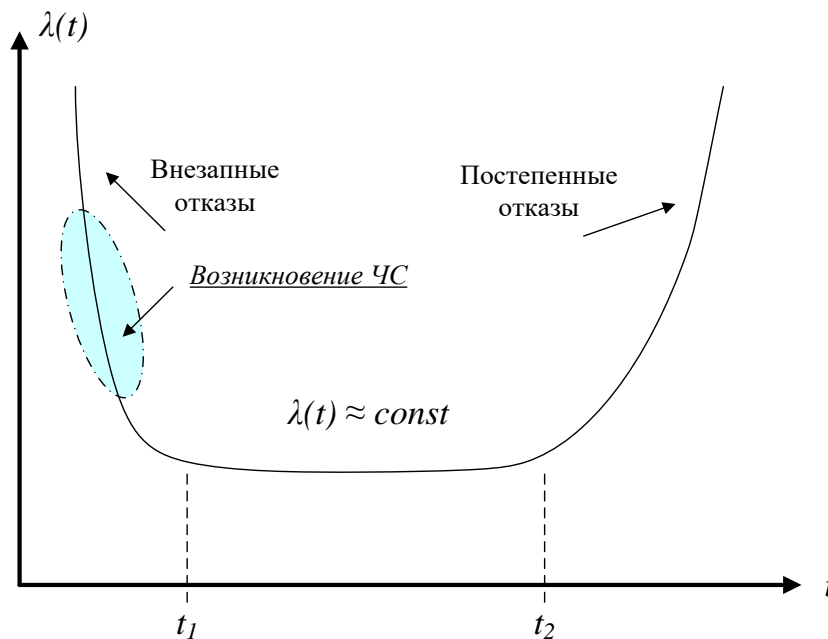


Рисунок 2.6 – Интенсивность отказов как функция времени

Последнее утверждение требует некоторого уточнения. Речь идет об отказах, обусловленных разрушающими воздействиями, которые напрямую связаны с ЧС. Некоторые виды разрушающих воздействий порождают отказы, которые произойдут позже. Обычно они связаны с нарушениями инфраструктуры телекоммуникационной системы и внешними условиями функционирования оборудования электросвязи. Актуальный пример таких "отложенных" отказов – нарушение электроснабжения. Этот аспект работы NGN в условиях ЧС исследуется в разделе 2.5.

С методологической точки зрения показатели надежности и качества обслуживания мультисервисного трафика принято рассматривать совместно [231]. Устойчивость телекоммуникационной системы к разрушающим воздействиям в значительной мере определяется структурными свойствами NGN. Они, в свою очередь, зачастую зависят от решений, принятых на предшествующих этапах модернизации телекоммуникационной системы.

Среди совокупности показателей, которые напрямую или косвенно связаны со структурными характеристиками сетей электросвязи, следует выделить некое множество  $\{Q\}$ . Это множество включает показатели, существенные для решения задач по восстановлению сети. Часть таких показателей может быть определена на основании норм, установленных для качества обслуживания, поддерживаемого телекоммуникационной системой. Соответствующее подмножество обозначается далее как  $\{Q_1\}$ . Другая группа показателей, образующая подмножество  $\{Q_2\}$ , должна быть выбрана в виде набора норм, которые действуют только в период ликвидации последствий ЧС.

В состав подмножества  $\{Q_1\}$  следует включить показатели, входящие в состав норм, которые определяют уровень качества обслуживания:

- коэффициенты готовности УК и трактов обмена IP-пакетами ( $A_i$  и  $A_{ij}$  соответственно);
- времена восстановления отказавших УК и трактов обмена IP-пакетами ( $R_i$  и  $R_{ij}$  соответственно);

- степени вершин графа, который служит моделью УК ( $L_i$ );
- кратность каждого ребра графа, которое является моделью тракта обмена IP-пакетами ( $O_{ij}$ ).

Показатели первого вида позволяют вычислить коэффициенты готовности для маршрутов обмена информацией между ИПС. Совокупность показателей третьего и четвертого вида служит источником для предварительной оценки сети с точки зрения ее способности к быстрому восстановлению в период ликвидации последствий ЧС. Очевидно, что нормы на перечисленные выше показатели можно задать в виде неравенств, в которых нижний индекс "0" определяет допустимое значение рассматриваемой величины:

$$A_i \geq A_0, \quad A_{ij} \geq A_{00}, \quad R_i \leq R_0, \quad R_{ij} \leq R_{00}, \quad L_i \geq L_0, \quad O_{ij} \geq O_{00}. \quad (2.3)$$

Для показателей из подмножества  $\{Q_2\}$  можно сразу же конкретизировать одну норму:

$$L_i \geq 1. \quad (2.4)$$

Неравенство (2.4) имеет очевидный физический смысл. Во-первых, каждая вершина графа не должна быть изолированной. Иными словами, для восстановления сети необходимо создать хотя бы дерево [200]. Во-вторых, неравенство (2.4) заменяет норму на показатель  $O_{ij}$ , так как существование дерева представляет собой достаточное условие для обмена информацией в границах сети электросвязи.

Поскольку действующие нормы на показатели  $R_i$  и  $R_{ij}$  сразу после наступления ЧС не могут быть выполнены, то соответствующим показателям следует присвоить другие численные значения, обозначаемые далее так:  $R_i^*$  и  $R_{ij}^*$ . Тогда нормы, образующие подмножество  $\{Q_2\}$ , можно представить в следующей форме:

$$A_i^* \geq A_0^*, \quad A_{ij}^* \geq A_{00}^*, \quad R_i^* \leq R_0^*, \quad R_{ij}^* \leq R_{00}^*, \quad L_i \geq 1. \quad (2.5)$$

В период ликвидации последствий ЧС необходимо, чтобы в дереве или в графе иной структуры, которую можно считать деревом с несколькими (одним или более) дополнительными ребрами, ни один элемент (вершина либо ребро) не

выходил из состояния работоспособности. В этом случае два показателя  $A_i^*$  и  $A_{ij}^*$  можно исключить из подмножества  $\{Q_2\}$ . В результате поставленную задачу можно упростить. Она сводится к минимизации величин  $R_i^*$  и  $R_{ij}^*$  при условии, что  $L_i \geq 1$ . Причем в большинстве случаев достаточно соблюсти условие  $L_i = 1$ . Такая упрощенная постановка задачи полезна, по крайней мере, для самого первого этапа восстановления сети – создания дерева. Следует подчеркнуть, что подобный подход может стать оправданным при условии, что удастся обеспечить нормы на принятые в период действия ЧС показатели качества обслуживания мультисервисного трафика, связанные с вероятностно-временными характеристиками сетей класса NGN.

Устойчивость телекоммуникационной системы к разрушающим воздействиям зависит от реализованных проектных решений. Они, как правило, отличаются от тех теоретических конструкций, которым свойственна высокая надежность. По этой причине, помимо показателей  $R_i^*$  и  $R_{ij}^*$ , следует анализировать значения коэффициентов готовности между УК в составе NGN. Этот анализ основан на оценке показателей  $A_i$  и  $A_{ij}$ . Данный вывод совпадает с результатами, которые были получены в процессе исследования работы СДЭ в условиях ЧС [95].

Восстановительные работы, проводимые в телекоммуникационной системе, можно разделить на несколько этапов. Последний этап подразумевает полноценное восстановление всех элементов NGN. Если рассматривать  $R_i^*$  и  $R_{ij}^*$  как случайные величины, заданные на ограниченных интервалах, то их распределения будут представлять собой ступенчатые функции. Для таких функций по известным правилам [25] вычисляются основные числовые характеристики (математическое ожидание, дисперсия и другие).

В данной главе диссертационной работы основное внимание уделяется первому этапу восстановительных работ, цель которого построение, как минимум, древовидной структуры NGN для возможности обмена информацией между УК в составе телекоммуникационной системы. В том случае, когда в результате ЧС

структура сети не подвергается разрушениям, длительность первого этапа восстановительных работ полагается равной нулю.

### **2.3 Структурные характеристики NGN и возможности обеспечения надежности телекоммуникационной системы**

К важнейшим структурным характеристикам NGN при разрушающих воздействиях относятся коэффициенты готовности УК и трактов обмена IP-пакетами, а также расстояния между трассами, по которым проложены линейно-кабельные сооружения. Для расчета коэффициентов готовности используются методы, детально разработанные в теории вероятностей. Оценка расстояний между трассами может быть выполнена при помощи геометрических соотношений. Основная проблема заключается не в математическом аппарате, а в корректной трактовке процессов, приводящих к отказам в сети. Данное утверждение не умаляет важности адекватного применения соотношений, полученных в теории вероятностей. Оно указывает на необходимость очень тщательного анализа физического смысла исследуемых процессов и выбора адекватных критериев для фиксации двух важных состояний: "работоспособность" и "отказ" [157].

Сразу после возникновения ЧС – при проявлении последствий разрушающих воздействий – под работоспособностью сети следует понимать существование, по крайней мере, дерева, то есть наличия связности всех вершин графа (узлов коммутации). Соответственно, отказом становится любое событие, когда вместо дерева возникает несколько лесов [153] либо – как предельный худший случай – набор изолированных вершин.

Коэффициенты готовности УК и трактов обмена IP-пакетами (величины  $A_i$  и  $A_{ij}$ ) следует определять на основании статистики, накопленной в процессе эксплуатации NGN. Данное утверждение основано на том факте, что в некоторых



случаях нормы, декларированные в тексте технических условий, не соответствуют реальным эксплуатационным характеристикам системы электросвязи.

Времена восстановления отказов для УК и трактов обмена IP-пакетами (величины  $R_i$  и  $R_{ij}$ ) определяются нормативными документами, которые следует пересмотреть для периода действия ЧС. Это утверждение обусловлено двумя факторами. Во-первых, последствия ЧС могут быть такими, что действующие нормы (и, что особо важно, имеющиеся ресурсы) не приемлемы для решения всех возникающих задач. Во-вторых, восстановление может быть основано на формировании сети со структурой типа "дерево" в течение некоего периода длительностью  $t_{ЧС}$ , а такая топология требует быстрого устранения любой неисправности, так как каждая из них ведет к распадению сети (появлению, как минимум, двух лесов). Получить диапазон изменения времени  $t_{ЧС}$ , как случайной величины, можно на основе реальной статистики, нормативных документов или за счет сбора и обработки мнений экспертов. В любом случае функцию распределения  $t_{ЧС}$  следует выбрать из совокупности законов, для которых  $t_{\min} \leq t_{ЧС} \leq t_{\max}$ . Величины  $t_{\min}$  и  $t_{\max}$  определяют соответственно минимальное и максимальное значения длительности времени, которое будет затрачено на восстановление сети.

При необходимости можно ввести несколько значений  $t_{ЧС}$ . Логично использовать три уровня этой величины: начальный  $t_{ЧС1}$ , промежуточный  $t_{ЧС2}$  и завершающий  $t_{ЧС3}$ . На начальном уровне (этапе) восстанавливается, как минимум, древовидная структура сети, то есть решается задача получения целостного объекта. На промежуточном уровне (этапе) воссоздается такая структура сети, которая более надежна, чем древовидная, но она еще не отвечает показателям, заданным проектными решениями и техническими условиями. В некоторых случаях к моменту  $t_{ЧС3}$  целесообразно реализовать иную топологию, более эффективную, чем предложенную в проектных решениях.

Степень вершины графа, служащей моделью  $i$ -го узла коммутации,  $L_i$  полезна для оценки неравномерности данного показателя. Для сети из  $N$  узлов

среднюю степень вершин  $L^{(1)}$  и дисперсию этой величины  $D_L$  можно определить по известным соотношениям [25]:

$$L^{(1)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_i, \quad D_L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (L_i - L^{(1)})^2. \quad (2.6)$$

Такой подход применим, если вес каждой вершины графа (важность УК в рассматриваемой сети) одинаков. Обычно при помощи экспертных оценок или иным способом можно определить вес каждой вершины  $w_i$ . Для начала удобно задать абсолютные значения важности вершины по пятибалльной шкале. Далее они обозначаются как  $W_i$ . Тогда искомые веса рассчитываются по такой формуле:

$$w_i = \frac{W_i}{\sum_{k=1}^N W_k}. \quad (2.7)$$

Оценка величин  $W_i$  может осуществляться на основе анализа штрафных функций, используемых для решения задач оптимизации [5]. В данном случае штрафная функция представляет собой набор дискретных величин  $W_i$ , вычисляемых как штраф в денежных единицах при отказе  $i$ -го УК. После проведения этих вычислений выражение (2.6) следует переписать в иной форме с учетом весов  $w_i$ :

$$L^{(1)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i L_i, \quad D_L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (w_i L_i - L^{(1)})^2. \quad (2.8)$$

На рисунке 2.7 показана гипотетическая модель сети электросвязи при нормальных условиях ее эксплуатации. В квадратных скобках указаны степени вершин, служащих моделями УК, а в фигурных скобках – их веса. Предполагается, что эти величины могут быть представлены положительными целыми числами. Соотношения (2.6) и (2.8) позволяют найти все необходимые метрики графа, служащего моделью сети. В частности, среднее значение вершины исследуемого графа примерно равно 3,1429. Корень из дисперсии этой же случайной величины (среднеквадратическое отклонение) составляет порядка 1,069. Коэффициент вари-

ации оценивается как 0,3402, что означает не столь существенный разброс случайной величины.

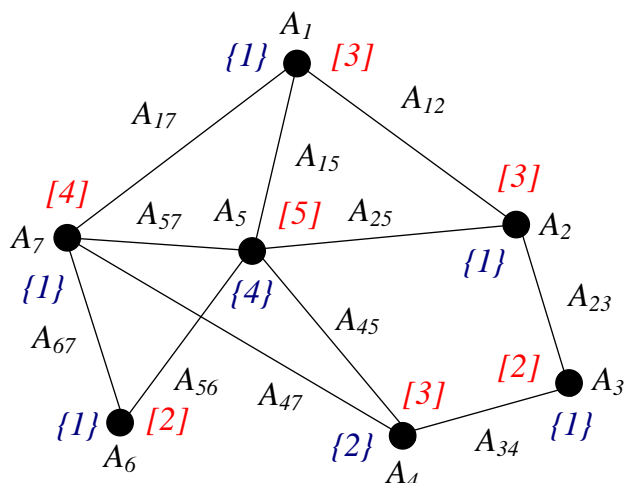


Рисунок 2.7 – Модель сети при нормальных условиях ее эксплуатации

С учетом веса каждой вершины среднее значение, среднеквадратическое отклонение, а также коэффициент вариации образуют такой набор метрик: 0,5195, 0,5861 и 1,1282. Последняя оценка означает, что разброс исследуемой случайной величины весьма значителен. С точки зрения решения задач по восстановлению сети, полученные оценки говорят об усложнении проблемы при учете важности каждого элемента в составе системы электросвязи.

Для нормальных условий эксплуатации сети логично поставить вопрос о минимизации дисперсии  $D_L$  при введении ограничения на минимальное значение величины  $L^{(1)}$ . Однако такой подход не будет корректным с точки зрения работы сети в период ликвидации последствий ЧС, так как наиболее вероятно не равномерное (по площади) распределение возникающих отказов, а их локализация с центром в границах некой территории  $S_i$ .

Кратность ребра графа между вершинами  $i$  и  $j$  можно оценивать как  $O_{ij} = 2$ , если между соответствующими узлами сети используется кольцо. Такой подход не всегда правомерен [64]. Проблема заключается в том, что в ряде проектов реализуется плоское кольцо [208] или его фрагмент. Тогда  $O_{ij} < 2$ . С другой стороны, использование кольца с хордой [187] позволяет достичь значений

$O_{ij} > 2$ . С этой точки зрения уместно определять значения  $O_{ij}$  на основании соотношений (2.6) и (2.8). Только в эти формулы вместо величин  $L_i$  подставляются значения  $O_{ij}$ .

В этом разделе основное внимание уделено характеристикам надежности и живучести NGN. Среди требований к ССОП в Федеральном законе "О связи" следует выделить устойчивость функционирования, регламентированную в ГОСТ Р 53111-2008 [28]. При реализации концептуальных положений NGN необходимо найти эффективные решения по выполнению требований, которые напрямую связаны с устойчивостью функционирования ССОП. В [99, 126] предложено применять аппаратно-программные средства, названные интеллектуальным шлюзом, для выполнения требования Федерального закона "О связи" и ГОСТ Р 53111-2008. Модель NGN, основанная на введении ИШ, была показана на рисунке 2.4.

Под устойчивостью функционирования понимается способность сети электросвязи выполнять свои функции при выходе из строя части элементов в результате воздействия дестабилизирующих факторов [28]. С точки зрения критерия последствия воздействий внешних дестабилизирующих факторов в ГОСТ Р 53111-2008 выделяется доля элементов ССОП, вышедших из строя. Используются три градации ущерба: высокой, средний и низкий, для которых максимальная доля неработоспособных элементов составляет 50%, 30% и 10% соответственно.

Формально в [28] не делается различий между понятиями надежности и живучести сети, но для анализа поведения NGN при возникновении ЧС они представляются актуальными. Дело в том, что при возникновении ЧС на NGN (как и на любую другую сеть электросвязи) действуют, в основном, силы, лежащие вне телекоммуникационной системы [50]. Иными словами, большей частью обслуживающий персонал при возникновении ЧС сталкивается с проблемами живучести сети. С другой стороны, проблем будет меньше, а решение возникающих задач станет проще, если на этапе разработки проектных решений и при их реализации обеспечивается высокая надежность NGN. Применение ИШ – пример реализации такого подхода к построению NGN.

В качестве показателей надежности [50, 157] используются коэффициент готовности  $A$  (в ряде отечественных публикаций –  $K_T$ ), среднее время наработки на отказ  $T_0$  и средняя длительность восстановления работоспособности  $T_B$ . Эти три показателя связаны между собой [157]:

$$A = \frac{T_0}{T_0 + T_B}. \quad (2.9)$$

Для оценки показателей живучести необходимо знать вероятность сохранения работоспособности при воздействии внешних дестабилизирующих факторов  $P(T)$  на отрезке времени  $T$ . Эта вероятность позволяет вычислить коэффициент оперативной готовности  $K_{o.g}$  [50]:

$$K_{o.g} = P(T) \times A. \quad (2.10)$$

Для величин  $A$  и  $K_{o.g}$  в составе ГОСТ Р 53111-2008 приведены нормы, которые различаются по нескольким классификационным признакам. Для численных оценок, которые типичны для перспективной телекоммуникационной системы, следует использовать самые "жесткие нормы":  $A \geq 0,9999$  и  $P(T) \geq 0,9$ . Такой подход представляется весьма логичным, так как требования и к надежности, и к живучести телекоммуникационной системы постоянно возрастают.

Постановка задачи проектирования NGN может быть сформулирована в следующем виде. Для ССОП, которая модернизируется на основе концептуальных положений NGN, заданы две нормы:  $A \geq 0,9999$  и  $P(T) \geq 0,9$ . Необходимо найти системное решение, которое обеспечит эти нормы рациональным способом. Под словами "рациональный способ" далее понимается совокупность операций, позволяющая получить результат, остающийся близким к оптимальному, в период времени, который примерно равен длительности жизненного цикла основных компонентов ССОП [64].

В условиях штатного функционирования NGN (при отсутствии отказов) задачи, решаемые ИШ, связаны, в основном, с выполнением функций взаимодействия аппаратно-программных средств, которые используют различные технологии коммутации – каналов и пакетов. В частности, в составе ТфОП могут исполь-

зоваться несколько видов интерфейсов на физическом уровне, а также разные системы сигнализации, предусмотренные действующими нормативными документами. Оборудование ИШ для взаимодействия с ТфОП выполняет функции транспортного и сигнального шлюзов, чтобы обеспечить эффективную работу аппаратно-программных средств, которые построены по идеологии NGN.

В некоторых случаях, определяемых спецификой построения местного участка NGN, оборудование ИШ может выполнять дополнительные функции. Опыт применения оборудования ИШ показал, что оно становится весьма эффективным средством повышения качества обслуживания трафика для системы оперативно-розыскных мероприятий (СОРМ) [35] и для единой дежурно-диспетчерской службы (ЕДДС) при ее использовании в составе Системы-112 [100].

При возникновении нештатных ситуаций аппаратно-программные средства ИШ приступают к решению нескольких новых задач. В качестве приоритетных задач для этого шлюза становятся функции по поддержке работы ЕДДС и СОРМ.

Перечень базовых требований, которые предъявляются к оборудованию ИШ, представляется следующим:

- обеспечение высокой надежности и живучести местного фрагмента ССОП при возникновении ЧС, а также с точки зрения выполнения функций ЕДДС и СОРМ;
- выполнение основных функций по обслуживанию трафика в случае отказа основного и резервного SSW;
- осуществление операций, возлагаемых на типичные транспортные шлюзы для взаимодействия с ТфОП и – при необходимости – с другими сетями связи;
- реализация оптимальной стратегии замены оборудования с коммутацией каналов за счет минимизации инвестиций Оператора связи;
- поддержка функциональных возможностей, специфических для конкретной сети Оператора связи, за счет дополнительного программного обеспечения ИШ.



ский уровень (кольца №1 и №2) образуют ВМ и другие элементы. Их количество в каждом из двух колец может быть любым. То, что ВМ в первом и во втором кольцах сгруппированы, не влияет на методологию оценки характеристик надежности и живучести. Внутри всех трех колец приведена дополнительная нумерация, которая используется в формулах для вычисления исследуемых характеристик.

Связь структур нижнего уровня иерархии с нулевым кольцом осуществляется, как минимум, в двух точках. По этой причине два нумерованных узла, окрашенных темным цветом, будут рассматриваться как абсолютно надежные. В этом случае поставленная задача сводится к оценке надежности и живучести между терминалами, подключенными в два произвольно выбранных ВМ, а также между терминалом, включенным в ВМ, и средствами ЕДДС либо СОПМ. Причем связь вида ВМ – ЕДДС рассматривается как приоритетная.

Соотношения, которые следует использовать для оценки надежности и живучести, будут идентичны. Различие будет заключаться только в переменной, которую следует подставлять в полученные формулы –  $A$  или  $K_{o.g}$ . По этой причине целесообразно ввести единое обозначение  $A$ , часто используемое в отечественной и в зарубежной технической литературе. Коэффициенты готовности ВМ, ИШ, SSW, а также средств ЕДДС и СОПМ будут полагаться отличными от единицы. Иными словами, узлы ССОП не считаются абсолютно надежными.

Для работоспособности фрагмента ССОП между терминалом  $j$ -го ВМ и ЕДДС необходимым условием становится наличие хотя бы одного маршрута. Пусть  $j$ -й ВМ располагается в первом кольце. Предположим для компактной записи формул, что вероятности работоспособного состояния всех узлов идентичны и равны  $q$ . Такое же допущение можно ввести для каналов, которые соединяют смежные узлы в кольце. Эта вероятность обозначается далее  $r$ . Вероятность успешного обслуживания трафика  $j$ -го ВМ в первом кольце  $A_1$  рассчитывается по следующей формуле:

$$A_1 = 1 - (1 - q^j r^j) (1 - q^{k+l-j} r^{k+l-j+1}). \quad (2.11)$$



Эта формула (как и две следующие) составлена на основании правил теории вероятностей [25], предполагая, что процессы отказов в разных компонентах телекоммуникационной системы взаимно независимы. Вероятность успешного обслуживания трафика в  $g$ -ом узле (ЕДДС, например, в предложенной модели считается узлом под номером 3) нулевого кольца  $A_0$  будет оцениваться по схожему соотношению:

$$A_0 = 1 - (1 - q^g r^g)(1 - q^{h-g} r^{h-g+1}). \quad (2.12)$$

Очевидно, что вероятность успешного обслуживания трафика между  $j$ -ым ВМ и ЕДДС определяется произведением  $A_0 \times A_1$ .

Для оценки работоспособности ССОП между ВМ разных колец произведение  $A_0 \times A_1$  следует умножить на вероятность успешного обслуживания трафика  $i$ -го ВМ во втором кольце  $A_2$ . Эта вероятность для  $i$ -го ВМ, по аналогии с соотношением (2.11), рассчитывается по следующей формуле:

$$A_2 = 1 - (1 - q^i r^i)(1 - q^{m+n-i} r^{m+n-i+1}). \quad (2.13)$$

Не исключено, что ВМ не включен в состав кольца или на каком-то участке сети используется решение типа "плоское кольцо". Тогда приведенные выше соотношения следует уточнить, используя, например, результаты, полученные в [97]. Построение "плоских колец" позволяет решить задачи по обеспечению высокой надежности транспортных ресурсов при отказах в оборудовании, но при условии работоспособности кабелей связи. При возникновении ЧС чаще других отказывают линейные сооружения. По этой причине "плоское кольцо" становится узким местом в составе транспортной сети.

Для получения численных оценок необходимо задать значения величин  $q, r, k, l, m$  и  $n$ . Кроме того, надо выбрать числа  $i$  и  $j$ . Пусть  $k = m = 5$ ,  $l = n = 1$ ,  $h = 4$ ,  $i = j = 2$ . Допустим, что величина  $q$  принимает три значения: 0,999, 0,9999 и 0,99999. Две последние величины соответствуют реальной надежности узлов NGN, а первая характерна для физически изношенных технических средств. Будем считать, что величины  $r$  на порядок меньше, что также не противоречит ста-

стистическим данным о надежности линейных сооружений. Результаты вычислений приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Оценка работоспособности ССОП при использовании ИШ

$q = 0,999; r = 0,99$		$q = 0,9999; r = 0,999$		$q = 0,99999; r = 0,9999$	
$A_0 \times A_1$	$A_0 \times A_1 \times A_2$	$A_0 \times A_1$	$A_0 \times A_1 \times A_2$	$A_0 \times A_1$	$A_0 \times A_1 \times A_2$
0,99816556	0,99701333	0,99998123	0,99996939	0,999999812	0,999999693

Очевидно, что полученные оценки соответствуют коэффициенту готовности, норма для которого, согласно приведенным выше данным, не превышает 0,9999. Этот уровень надежности обеспечивается при реальных вероятностях работоспособного состояния современного оборудования класса NGN. Если в составе сети эксплуатируются физически устаревшие технические средства, то, как следует из данных первого и второго столбцов таблицы, требования ГОСТ Р 53111-2008 не выполняются.

Для получения оценок живучести данные, приведенные в таблице 2.1, формально следует умножить на величину  $P(T) = 0,9$ . Очевидно, что при любых мероприятиях по обеспечению надежности порог 0,9 будет максимальной оценкой живучести. На самом деле, при использовании даже одного ИШ следует скорректировать методологический подход по расчету величины  $P(T)$ . Правда, такое утверждение будет верным при условии, что оборудование интеллектуального шлюза располагается не в одном помещении с аппаратно-программными средствами SSW, ЕДДС и СОРМ. В таком случае даже для доли неработоспособных элементов, равной 50%, вероятность выхода из строя обоих SSW и всех шлюзов становится сравнительно низкой.

Последнее утверждение становится не совсем корректным, если при построении кольцевых топологий используются фрагменты с общими трассами. Такая ситуация чаще всего встречается при проектировании сетей доступа [97, 130]. Модель сети доступа, которая типична для эксплуатируемых городских телефонных сетей [56, 187], показана на рисунке 2.9. Между кроссом УК и распределен-

тельным шкафом располагается магистральный участок (МУ) сети доступа. Распределительный участок (РУ) занимает пространство между шкафом и ИПС. В сети телефонной связи функции ИПС фактически выполняет распределительная коробка. Правда, в некоторых случаях местом размещения ИПС целесообразно считать телефонную розетку. Из кросса выходит несколько направлений МУ. Соответственно, из каждого шкафа организуется несколько направлений РУ.

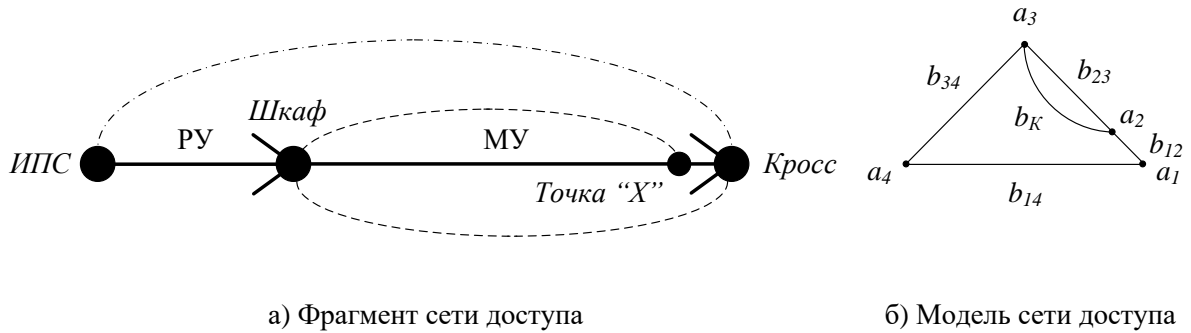


Рисунок 2.9 – Сеть доступа и ее модель в виде неориентированного графа

Иногда несколько многопарных кабелей, используемых для построения разных МУ, прокладывались на некотором участке кабельной канализации совместно. Часть МУ, для которого использовано подобное решение, располагается между кроссом и некой точкой "X". При организации кольцевых топологий за счет объединения нескольких узлов, в которых в настоящее время располагаются распределительные шкафы, наличие точек "X" усложняет задачу повышения надежности сети доступа.

Данное утверждение целесообразно пояснить на модели сети доступа, которая представлена в виде неориентированного графа в правой части рисунка 2.9. Граф содержит четыре вершины  $a_1, a_2, a_3$  и  $a_4$ , а также пять ребер  $b_{12}, b_{23}, b_{34}, b_{14}$  и  $b_K$ . Вершины графа  $a_1, a_2, a_3$  и  $a_4$  соответствуют кроссу, точке "X", шкафу и ИПС соответственно. Ребра графа  $b_{12}, b_{23}, b_{34}, b_{14}$  следует рассматривать как компоненты сети доступа между кроссом и точкой "X", точкой "X" и шкафом, шкафом и ИПС, кроссом и ИПС (в настоящее время такие связи отсутствуют). Ребро  $b_K$  представляет собой часть кольца, которое появится после модернизации сети до-

ступа. Ребро  $b_k$  целесообразно рассматривать как обобщенную модель маршрута, состоящего из  $n$  вершин и  $n - 1$  ребер.

Первый вариант повышения надежности основан на организации колец между шкафами, а создание ребра  $b_{14}$  не предусматривается. Если каждому ребру приписать коэффициент готовности, то для ребра  $b_{14}$  соответствующее значение  $A_{14} = 0$ . Для анализа эффективности первого варианта повышения надежности сети доступа необходимо определить коэффициент готовности ребра  $b_k$  – величину  $A_k$ . С этой целью целесообразно конкретизировать модель, показанную в правой части рисунка 2.9. В частности, можно удалить ребро  $b_{14}$ , а также детализировать структуру ребра  $b_k$ . Соответствующая модель показана на рисунке 2.10. В ней вершина  $a_3$  является и первым узлом кольца  $k_1$ . По этой причине обозначение  $k_1$  указано в скобках после записи  $a_3$ . Аналогичное решение использовано для вершин  $a_2$  и  $k_n$ .

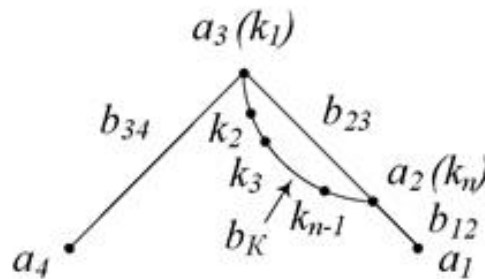


Рисунок 2.10 – Модель для первого варианта повышения надежности

Коэффициент готовности для ребра  $b_k$  можно оценить на основании положений теории вероятностей. Для этого необходимо знать вероятности работоспособного состояния  $i$ -ой вершины ( $i = \overline{1, N}$ ) и  $j$ -го ребра ( $j = \overline{1, N - 1}$ ):

$$A_k = \prod_{i=1}^N p_i \prod_{j=1}^{N-1} q_j. \quad (2.14)$$

Теперь несложно получить выражение, определяющее коэффициент готовности между вершинами  $a_1$  и  $a_4$ . Далее будем полагать, что все вершины графа абсолютно надежны. Для первого варианта коэффициент готовности обозначается

как  $A_I$ . С учетом соотношения (2.14) и принятого допущения можно записать следующее выражение:

$$A_I = q_{12} \times [1 - (1 - A_K) \times (1 - q_{23})] \times q_{34}. \quad (2.15)$$

Для реальных сетей доступа величина  $N$  не превышает пяти узлов. Надежность кольца будет весьма высока. По протяженности участок сети доступа, построенный за счет кольца, составляет около 80% длины от терминала пользователя до кросса. По этой причине формирование колец позволяет заметно повысить надежность сети доступа. Очевидно, что проблемы обеспечения сети доступа в целом будут определяться двумя величинами:  $q_{12}$  и  $q_{34}$ . Если трассы МУ проходят по разным направлениям кабельной канализации, то точка "X" отсутствует. Подобную ситуацию можно интерпретировать как наличие двух абсолютно надежных элементов: вершины  $a_2$  и ребра  $b_{12}$ . В этом случае выражение (2.15) упрощается:

$$A_I = [1 - (1 - A_K) \times (1 - q_{23})] \times q_{34}. \quad (2.16)$$

Из формулы (2.16) можно сделать вывод о том, что надежность сети доступа будет определяться коэффициентом готовности на участке от шкафа до ИПС. Хотя длина этого участка не столь велика, пренебрегать возможностью отказа распределительного кабеля нельзя [130]. Особенно в том случае, если данный кабель используется для корпоративных абонентов, которые обычно заключают SLA – соглашение об уровне обслуживания [198]. Это значит, что необходимо обеспечить резервирование и на распределительном участке сети доступа.

Второй вариант повышения надежности сети доступа основан на использовании беспроводных технологий для создания ребра  $b_{14}$  [252]. Модель сети доступа изображена в левой части рисунка 2.11. Модель, которая показана в левой части рисунка 2.11, не предусматривает создание колец на уровне магистральных участков сети доступа.

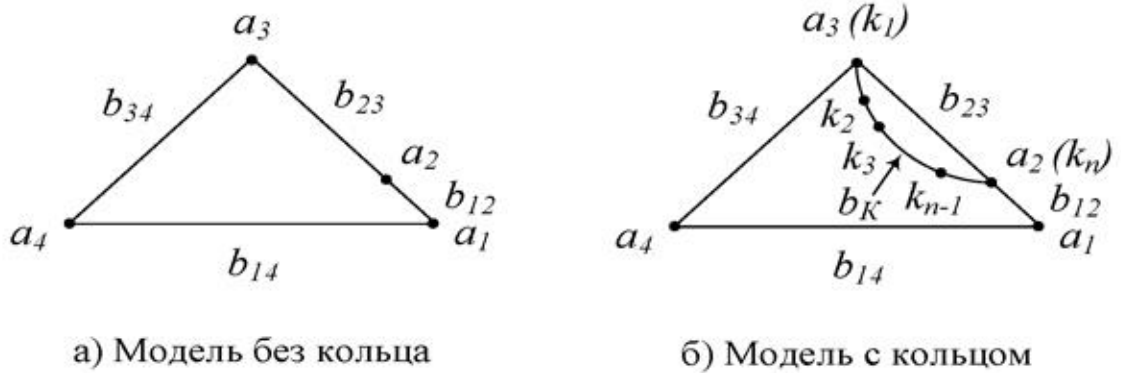


Рисунок 2.11 – Модели для второго варианта повышения надежности

Для модели (б) выражение для коэффициента готовности, который обозначается далее как  $A_{II}^{(\delta)}$ , определяется на основании формул (2.15) или (2.16) в зависимости от наличия или отсутствия точки "X":

$$A_{II}^{(\delta)} = 1 - (1 - A_I) \times (1 - q_{14}). \quad (2.17)$$

Для модели (а) коэффициент готовности обозначается далее как  $A_{II}^{(a)}$ . Для его расчета можно записать следующее соотношение:

$$A_{II}^{(a)} = 1 - (1 - q_{12} \times q_{23} \times q_{34}) \times (1 - q_{14}). \quad (2.18)$$

Если точка "X" в сети доступа отсутствует, то в формулу (2.18) следует подставить  $q_{12} \equiv 1$ .

Для получения численных оценок коэффициентов готовности можно использовать два подхода. Первый подход основан на том, что значения  $q_{ij}$  не зависят от длин участков сети доступа. В этом случае нижние индексы можно опустить. Предположим также, что  $N = 3$ . Будем рассматривать сеть доступа, в которой есть точка "X". Тогда справедливы такие соотношения:

$$A_I = q^3 \times (1 + q - q^2), A_{II}^{(a)} = q \times (1 + q^2 - q^3), A_{II}^{(\delta)} = q \times (1 + q^2 - 2q^4 + q^5). \quad (2.19)$$

Результаты вычисления трех исследуемых величин коэффициентов готовности приведены во второй, в третьей и в четвертой строках таблицы 2.2. Очевидно, что справедливо такое неравенство:  $A_I \leq A_{II}^{(a)} \leq A_{II}^{(\delta)}$ .

Таблица 2.2 – Коэффициенты готовности для разных вариантов развития сети доступа

Параметры	$q = 0,9$	$q = 0,99$	$q = 0,999$	$q = 0,9999$
$A_I$	0,79461000	0,97990496	0,99799901	0,99980000
$A_{II}^{(a)}$	0,972900000,	0,99970299	0,99999700	0,99999997
$A_{II}^{(б)}$	97946100	0,99979905	0,99999800	0,99999998
$\Delta = A_{II}^{(б)} - A_{II}^{(a)}$	$6,6 \times 10^{-3}$	$9,6 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-8}$

Значения  $q$  при вычислениях увеличивались путем добавления очередной "девятки" после запятой. В последней строке приведена величина  $\Delta$ , равная  $A_{II}^{(б)} - A_{II}^{(a)}$ . С практической точки зрения целесообразно рассматривать значения параметра  $q \geq 0,999$ . В этом случае второй вариант повышения надежности сети доступа позволяет выйти на уровень требований SLA, нормирующих коэффициент готовности величиной 0,99999 [198]. Различие между величинами  $A_{II}^{(a)}$  и  $A_{II}^{(б)}$  при  $q \geq 0,999$  не превышает  $10^{-6}$ . Это значит, что эффективность построения колец на магистральном участке сети доступа – с точки зрения обеспечения надежности между ИПС и кроссом – незначительна. Правда, создание колец может быть полезным для сокращения затрат на восстановительные работы при обрыве кабелей связи на магистральном участке.

Второй подход основан на том, что значения  $q_{ij}$  зависят от длин участков сети доступа  $l_{ij}$ . Для приближенного анализа коэффициента готовности будем считать, что фрагмент сети доступа, который построен за счет кольцевых топологий, абсолютно надежен. Это означает, что  $A_K \equiv 1$ . Тогда формула (2.15) существенно упрощается:

$$A_I \approx q_{12} \times q_{34}. \quad (2.20)$$

Пусть  $U$  (Unavailability) – коэффициент простоя для ребра "единичной длины". В этом случае значение  $q_{12}$  можно определить следующим образом:  $q_{12} = 1 - U \times l_{12}$ . Длину  $l_{12}$  удобно выразить при помощи коэффициента  $\beta$ :

$$\beta = \frac{l_{12}}{l_{12} + l_{23}} \rightarrow l_{12} = \frac{\beta l_{23}}{1 - \beta}. \quad (2.21)$$

Выше упоминалось, что соотношение между длинами МУ и РУ стабильно. Можно ввести коэффициент  $\gamma$ , определяющий связь между двумя слагаемыми –  $l_{34}$  и  $(l_{12} + l_{23})$ :

$$\gamma = \frac{l_{34}}{l_{12} + l_{23}} \rightarrow l_{34} = \frac{\gamma l_{23}}{1 - \beta}. \quad (2.22)$$

Теперь соотношение (2.20), используя введенные обозначения, можно переписать в следующей редакции:

$$A_l \approx \left( 1 - U \times \frac{\beta l_{23}}{1 - \beta} \right) \times \left( 1 - U \times l_{23} \frac{\gamma}{1 - \beta} \right). \quad (2.23)$$

Для качественного анализа изменений величины  $A_l$  можно принять, что  $l_{23} = 1$ . Кроме того, целесообразно использовать устойчивую оценку  $\gamma \approx 0,2$ . Анализ проектов по построению сетей доступа позволяет сформулировать такую гипотезу: коэффициент  $\beta$  следует рассматривать как случайную величину, равномерно распределенную на отрезке от нуля до 0,5. Это значит, что  $0 \leq \beta \leq 0,5$ .

Фактически величина коэффициента  $\beta$  определяет место размещения точки "X", которое влияет на коэффициент готовности. Характер этого влияния иллюстрирует рисунок 2.12. Он построен для коэффициента простоя ребра "единичной длины", равного  $10^{-3}$ . Кривая, приведенная на рисунке 2.12, отражает численные оценки интуитивно понятной зависимости: чем длиннее участок кабельной канализации, в котором проложено несколько магистральных кабелей, тем меньше коэффициент готовности сети доступа. По всей видимости, на этапе проектирования сетей доступа необходимо получить экономические оценки для возможных вариантов повышения их надежности. Тогда в проекты по модернизации сетей досту-



па можно внести оптимальные решения с учетом требований по устойчивости функционирования ССОП.

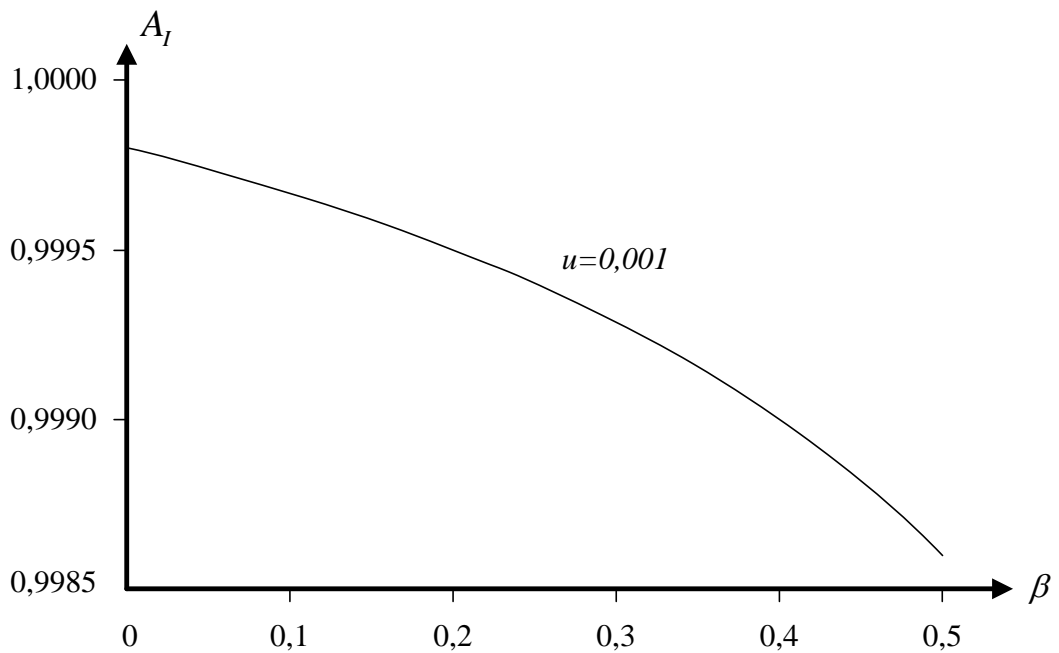


Рисунок 2.12 – Влияние места размещения точки "X" на коэффициент готовности

На рисунках 2.4 и 2.8 встречается элемент, названный ЕДДС. Его можно рассматривать как ЦОВ, используемый в Системе-112 для обслуживания вызовов абонентов ССОП при возникновении ситуаций, которые связаны с необходимостью вмешательства сотрудников МЧС и пожарной службы, полиции, скорой помощи, аварийной службы газовой сети. Часть вызовов в ЦОВ Системы-112 никак не связана с ЧС. При возникновении ЧС некоторая часть вызовов в ЦОВ (в некоторых случаях – доминирующая) будет обусловлена именно этим фактом. По этой причине аспекты надежности доступа в ЕДДС представляются весьма актуальными.

Основные принципы связи абонентов ТфОП с рабочими местами операторов (РМО) в составе ЕДДС были predeterminedены решениями, принятыми на заре автоматизации телефонной связи. Тогда были разработаны системно-сетевые решения для ныне действующих дежурно-диспетчерских служб (ДДС), доступ к которым осуществляется по двухзначным номерам "01", "02", "03" и "04".

Способы доступа к РМО в составе ДДС можно представить при помощи схемы организации связи, приведенной в верхней части рисунка 2.13. В нижней части иллюстрации приведены две модели в виде графов, позволяющие оценить характеристики и надежности доступа к РМО, которые работают в составе ДДС, и качества обслуживания вызовов. В предложенной модели используется терминология, принятая для городских телефонных сетей, но рассматриваемые вопросы, как и методы решения возникающих задач, идентичны и для сельских телефонных сетей.

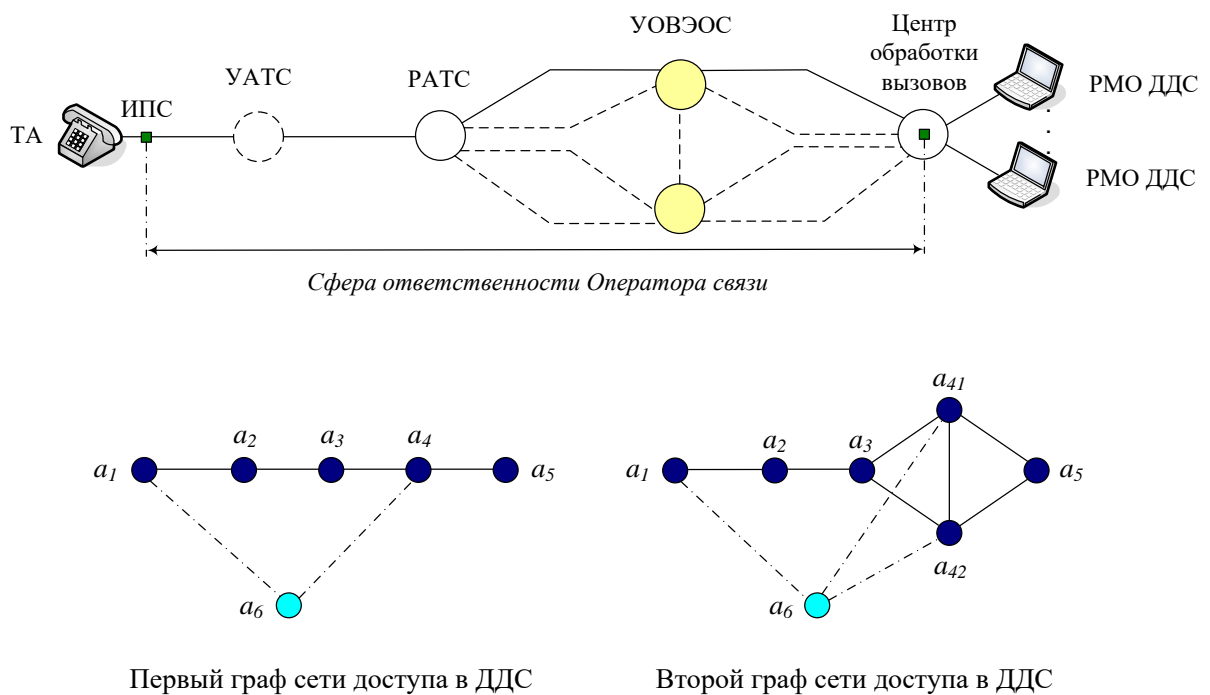


Рисунок 2.13 – Модель доступа абонентов к РМО действующих ДДС

Терминал абонента присоединяется к ССОП через ИПС. Этот интерфейс удобно рассматривать как точку, с которой начинается зона ответственности Оператора связи. Для графов, приведенных в нижней части рисунка 2.13, ИПС соответствует вершине  $a_1$ . В некоторых случаях соединение будет устанавливаться через УАТС – вершина графа под номером  $a_2$ . Далее обслуживание вызова осуществляется в РАТС. Ей соответствует вершина графа  $a_3$ . Каждая РАТС связана с узлом обслуживания вызовов экстренных оперативных служб (УОВЭОС), которому соответствует вершина графа  $a_4$ . Иногда оборудование УОВЭОС для по-

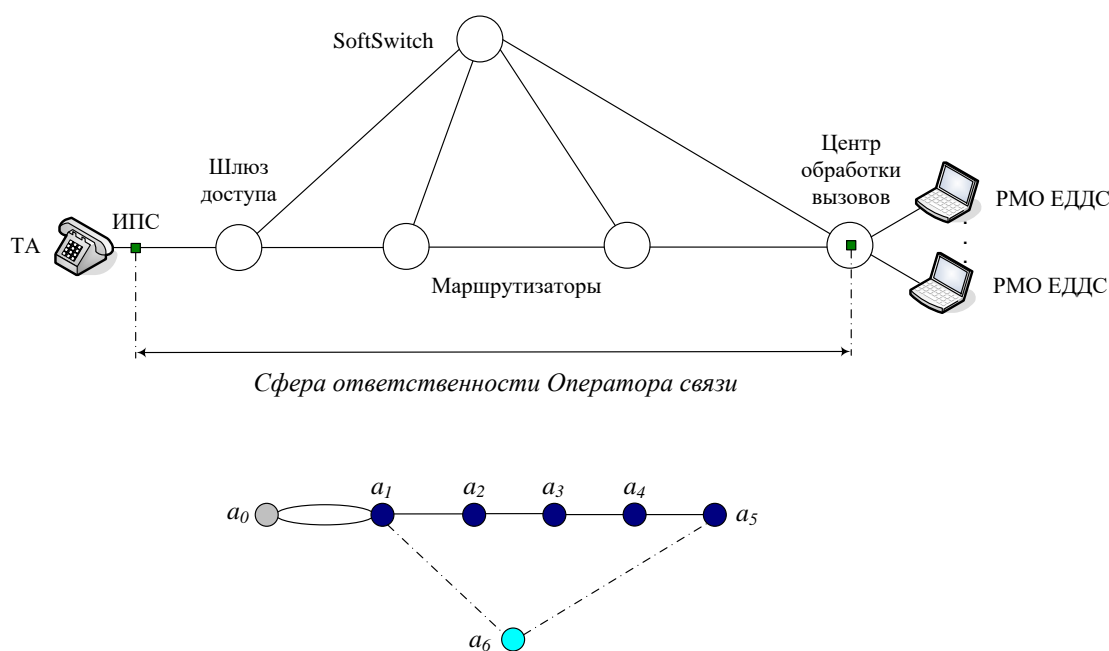
вышения надежности и живучести сети разносится на две площадки. Такая возможность изображена в верхней части рисунка 2.13 в виде двух элементов, соединенных между собой пунктирной линией. Другие пунктирные линии, исходящие из УОВЭОС и входящие в него, отображают резервные пучки соединительных линий, которые создаются за счет применения кольцевых топологий транспортной (первичной) сети. Если для УОВЭОС задействована вторая площадка, то граф, отображающий структуру сети, будет содержать вершины  $a_{41}$  и  $a_{42}$ . Такая возможность показана для второго графа – левый нижний фрагмент модели.

Формально сфера ответственности Оператора связи заканчивается в точке, которая входит в состав аппаратно-программных средств центра обслуживания вызовов. Тем не менее, целесообразно считать, что эта точка расположена на выходе оборудования центра обслуживания вызовов – в местах подключения РМО. Тогда центру обслуживания вызовов будет соответствовать вершина графа  $a_5$ .

Для доступа к РМО абонент может воспользоваться и мобильным телефоном. С точки зрения модели в виде графа такую возможность следует учитывать введением вершины  $a_6$ . Она служит моделью всех элементов сети связи с подвижными объектами, которые задействованы для доступа к УОВЭОС. Ребра графа, проходящие через вершину  $a_6$ , изображены штрихпунктирными линиями. Дальнейший анализ можно проводить для второго графа. Очевидно, что первый граф может быть получен из второго при следующем условии: коэффициент готовности вершины  $a_{42}$  равен нулю. В этом случае можно считать, что все ребра, инцидентные данной вершине, также имеют нулевой коэффициент готовности.

Результаты анализа характеристик надежности для доступа к РМО приведены в [97, 99]. Они полезны также для исследования характеристик надежности при переходе к NGN и реализации ЕДДС. Данное утверждение обусловлено тем, что при замене УАТС, РАТС и УОВЭОС оборудованием NGN модели доступа в ЕДДС будут представлены графами, очень похожими на структуры, которые показаны в нижней части рисунка 2.13. Дальнейший анализ можно проводить при помощи второго графа.

С другой стороны, использование в составе NGN контроллеров транспортных шлюзов, более известных по названию SoftSwitch [33], меняет рассматриваемую модель с точки зрения надежности системы управления ССОП. Способы доступа к РМО в составе ЕДДС можно представить при помощи схемы организации связи, приведенной в верхней части рисунка 2.14. В нижней части иллюстрации приведена модель в виде графа, позволяющая оценить характеристики надежности доступа.



Граф сети доступа в ЕДДС при переходе к NGN

Рисунок 2.14 – Модель доступа абонентов NGN к РМО создаваемой ЕДДС

Предполагается, что между шлюзом доступа и центром обработки вызовов в сети располагается два маршрутизатора. В каждом субъекте Российской Федерации будет установлено, как минимум, два коммутатора SoftSwitch. Это позволяет рассматривать модель с одной новой вершиной графа  $a_0$  как обладающую очень высокой надежностью. Она будет связана с вершиной  $a_1$  двумя ребрами. Наличие двух ребер подчеркивает тот факт, что приняты меры для обеспечения высокой надежности подключения оборудования SoftSwitch ко всем другим элементам сети NGN. Размещение вершины  $a_0$  в начале маршрута не противоречит модели сети NGN, используемой для исследования характеристик надежности.

Схемы организации связи, приведенные на рисунках 2.13 и 2.14, хорошо иллюстрируют два состояния ССОП – использование только технологии "коммутация каналов" и завершение процесса перехода к NGN, когда применяется только технология "коммутация пакетов". Естественно, переход к NGN будет длительным процессом. По этой причине интересны типовые схемы организации связи на переходный период, но они не меняют рассматриваемые ниже модели.

Если анализировать особенности модернизации телефонной сети при переходе к NGN при помощи предложенных моделей в виде графов, то несложно сформулировать две задачи. Первая задача заключается в оценке надежности доступа к РМО ЕДДС. Решать эту задачу необходимо для периода действия ЧС "наихудшего случая" с точки зрения выполнения всех требований к ЕДДС. Вторая задача – оценка качества обслуживания вызовов, поступающих в ЕДДС. Решение этой задачи следует осуществлять для всех видов вызовов, то есть обращения абонентов к РМО посредством телефонного соединения (через сети фиксированной и мобильной связи), отправки SMS, выхода по сети Интернет или иным способом.

При возникновении ЧС часть элементов сети может стать неработоспособной. С точки зрения моделей, показанных в нижней части рисунков 2.13 и 2.14, необходимо перейти к случайным графам [166, 168, 173]. Это означает, что количество вершин и ребер графа, степень каждой вершины и вес каждого ребра графа следует рассматривать как случайные величины. Выше было показано, что в условиях ЧС заметное повышение надежности ССОП при ее построении на основе NGN-решений достигается применением интеллектуального шлюза.

Данное утверждение можно продемонстрировать при помощи модели, которая приведена на рисунке 2.15. Интеллектуальный шлюз в данной модели соответствует вершине  $a_8$ . Такой подход представляется оправданным, так как интеллектуальный шлюз выполняет, среди прочих, основные функции по обслуживанию трафика в случае невозможности взаимодействия с обоими коммутаторами SoftSwitch.

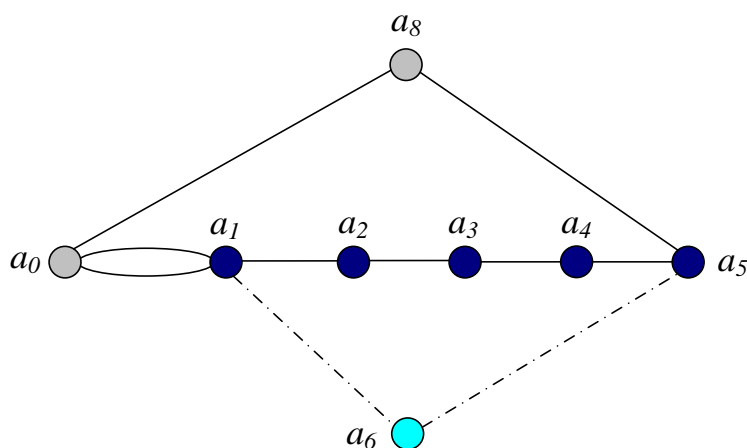


Рисунок 2.15 – Повышение надежности доступа к ЕДДС  
за счет установки интеллектуальных шлюзов

Предположим, что вероятность нахождения вершины графа  $a_8$  в состоянии работоспособности равна  $q$ . Для ребер графа между вершинами  $a_0$  и  $a_8$ , а также  $a_5$  и  $a_8$  эта вероятность равна  $p$ . Как правило,  $q > p$ . Пусть  $A$  – коэффициент готовности сети без использования ИШ. Тогда коэффициент готовности сети после установки интеллектуального шлюза  $A_{ИШ}$  можно оценить очевидным соотношением:

$$A_{ИШ} = 1 - (1 - A) \times (1 - qp^2). \quad (2.24)$$

Из этой формулы легко определить требования к максимальной вероятности нахождения линии связи для интеллектуального шлюза в состоянии работоспособности. Эту величину можно рассматривать как вероятность сохранения связности сети [166]. С этой целью предположим, что  $q = p$ . Если задана норма на коэффициент готовности  $A_{ИШ}$ , то вероятность  $p$  определяется следующим образом:

$$p = \sqrt[3]{1 - \frac{1 - A_{ИШ}}{1 - A}}. \quad (2.25)$$

Для получения численной оценки рассмотрим ситуацию, когда коэффициент готовности  $A = 0,999$ , а желаемый уровень этой величины определяется так называемым правилом "пять девяток" [198]. Это означает, что  $A_{ИШ} = 0,99999$ . В этом случае необходимо соблюдать условие  $p > 0,9967$ , что обеспечивается использованием обычных средств электросвязи. Подобные оценки подтверждают

целесообразность использования интеллектуальных шлюзов для надежной работы ЕДДС даже в период возникновения ЧС. Данный подход позволит эффективно выполнить все требования к надежности и живучести ЕДДС, которые связаны с реализацией Распоряжения Правительства РФ "О Концепции создания системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб через единый номер 112 на базе единых дежурно-диспетчерских служб муниципальных образований" [158] и Указа Президента России "О совершенствовании системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб на территории РФ" [162].

#### 2.4 Анализ типичных состояний телекоммуникационной системы при разрушающих воздействиях разного рода

Для определения типичных состояний телекоммуникационной системы, которые могут возникнуть вследствие разрушающих воздействий, уместно вернуться к модели, показанной на рисунке 2.7, дополнив ее рядом геометрических величин. В новой версии эта модель изображена на рисунке 2.16. Она позволяет перейти к анализу структурных характеристик NGN.

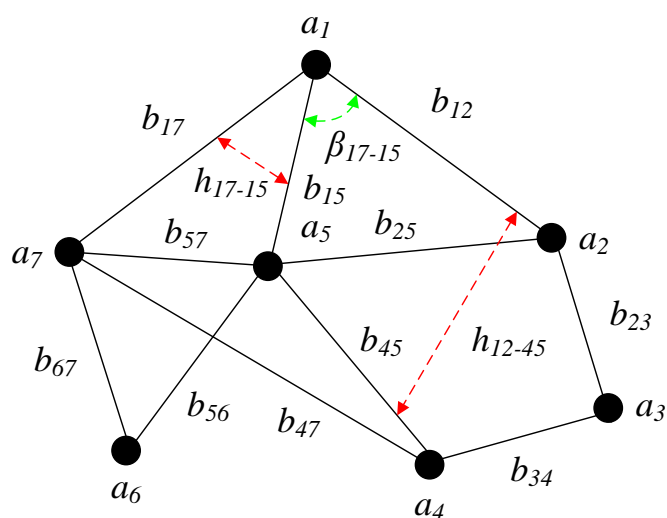


Рисунок 2.16 – Модель для анализа структурных характеристик NGN

Пунктирными линиями изображены расстояния  $h_{17-15}$  и  $h_{12-45}$ , а также угол  $\beta_{17-15}$ . В общем случае далее будут использоваться обозначения вида  $h_{ab-cd}$  и  $\beta_{ab-cd}$  соответственно. Величины  $h_{ab-cd}$  позволяют оценить возможность отказа двух или более трактов обмена информацией при проявлении разрушающих воздействий разной природы.

С этой целью рассмотрим аналогичную задачу из перечня проблем, которым посвящена монография [68]. Предположим, что площадь при разрушающем воздействии может быть представлена в виде круга с радиусом  $r$ . Данную величину следует считать случайной, распределенной с плотностью  $f(r)$ . За исключением редких ситуаций, связанных, например, с масштабными ЧС, функцию  $f(r)$  можно представить распределением, заданным на конечном интервале  $(0, X)$  [19]. Практический интерес представляют те случаи, когда центр круга находится в границах территории, обслуживаемой сетью. С точки зрения выбранной модели это эквивалентно размещению центра круга на "внутренней стороне" ребер  $b_{17}$ ,  $b_{12}$ ,  $b_{23}$ ,  $b_{34}$ ,  $b_{47}$  и  $b_{67}$ .

При попадании в круг радиусом  $r$  только одного ребра отказа в сети не происходит. Практический интерес представляют ситуации, при которых в границах круга находится два и более ребра графа. Такие случаи возникают при условии, что  $h_{17-15} \leq 2r$  и  $h_{12-45} \leq 2r$  соответственно. При разработке проектных решений следует стремиться к максимизации величин вида  $h_{ab-cd}$ . В условиях эксплуатации анализ величин  $h_{ab-cd}$  при известных параметрах распределения  $f(r)$  позволяет прогнозировать поведение сети класса NGN и разработать ряд превентивных мер по ее скорейшему восстановлению при ликвидации последствий ЧС.

Сначала необходимо исследовать влияние характера распределения  $f(r)$  на структурные характеристики сети. В качестве трех типичных законов распределения [19] представляется уместным взять такой набор:

- равномерное;
- параболическое;



- треугольное (Симпсона).

В таблице 2.3 для области определения трех выбранных функций на отрезке  $(0, X)$  приведены значения математического ожидания  $r^{(1)}$ , коэффициента вариации  $v_r$  и квантиля  $r_{0,95}$  – величины  $r$ , вычисленной при  $f(r) = 0,95$ . Для всех распределений коэффициент асимметрии равен нулю.

Таблица 2.3 – Характеристики для трех распределений  $f(r)$

Вид распределения	$r^{(1)}$	$v_r$	$r_{0,95}$
равномерное	$\frac{X}{2}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$0,95X$
параболическое	$\frac{X}{2}$	$\frac{1}{\sqrt{5}}$	$\approx 0,86X$
треугольное	$\frac{X}{2}$	$\frac{1}{\sqrt{6}}$	$\approx 0,84X$

Равенство значений математического ожидания и близость значений 95% – 20 квантиля допускает выбор для дальнейшего исследования модели равномерного распределения, так как ему присущ максимальный уровень коэффициента вариации. Это позволит получить "верхние оценки" для тех параметров сети, которые напрямую связаны с величинами  $h_{ab-cd}$  и  $\beta_{ab-cd}$ .

Важным фактором сохранения дерева следует считать условие: круг с радиусом  $r$  не покрывает два ребра графа, исходящие из одной вершины и являющиеся максимально удаленными друг от друга. На рисунке 2.17 показана одна вершина с четырьмя ребрами. Максимально удаленными друг от друга будут ребра  $b_{12}$  и  $b_{15}$ . Следует подчеркнуть, что предложенное условие не является обязательным. Алгоритм анализа связности после наступления разрушающих воздействий рассматривается в пятой главе диссертационной работы на модели в виде гиперсети.

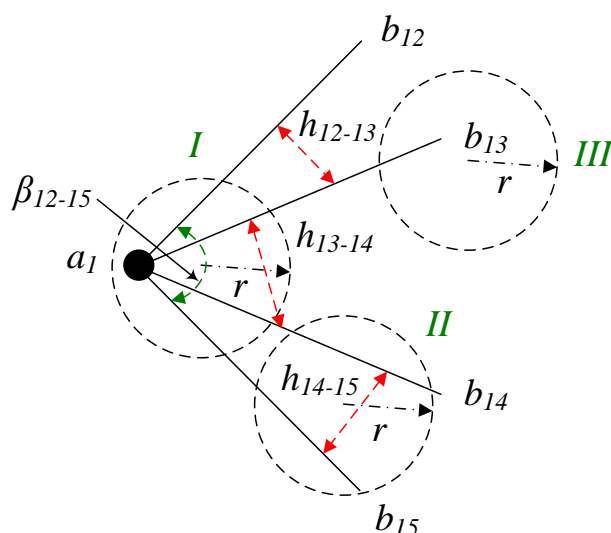


Рисунок 2.17 – Выбор ребер, максимально удаленных друг от друга

Для исследуемого графа изображены три варианта покрытия кругом с радиусом  $r$ . Они обозначены римскими цифрами. Очевидно, что варианты II и III не приводят к изоляции вершины  $a_1$ . Иная ситуация складывается при реализации варианта I. Вершина  $a_1$  становится изолированной даже в том случае, если она (аппаратно-программные средства УК) не переходит в состояние "отказ".

С теоретической точки зрения интересно распределение, которое будет характеризовать вероятность изоляции вершины графа, то есть переход узла коммутации в состояние "отказ". С этой целью необходимо определить или задать на основе экспертных оценок [154] следующие величины и атрибуты:

- длины ребер, максимально удаленных друг от друга (для модели, приведенной на рисунке 2.17, ими являются ребра  $b_{12}$  и  $b_{15}$ );
- величину угла между ребрами, максимально удаленными друг от друга (для рассматриваемой модели – угол  $\beta_{12-15}$ );
- набор величин  $r_i$ , которые определяют радиусы круга для заранее выбранного множества типичных ЧС;
- допущения и ограничения, которые позволяют решить поставленную задачу и приемлемы с практической точки зрения.

Допущения и ограничения, используемые для решения поставленной задачи, можно объяснить при помощи модели, приведенной на рисунке 2.18. В ней

выделены два ребра  $b_{12}$  и  $b_{15}$ , показаны трассы кабельной канализации  $y_{12}$  и  $y_{15}$ , отображающие пути прокладки кабельных линий. В этом случае вместо угла  $\beta_{12-15}$  следует определять несколько углов. На рисунке 2.18 показан только один из таких углов; он обозначен как  $\alpha_{12-15}$ . Максимальные длины между ребрами  $b_{12}$  и  $b_{15}$  и трассами  $y_{12}$  и  $y_{15}$  равны  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ , соответственно.

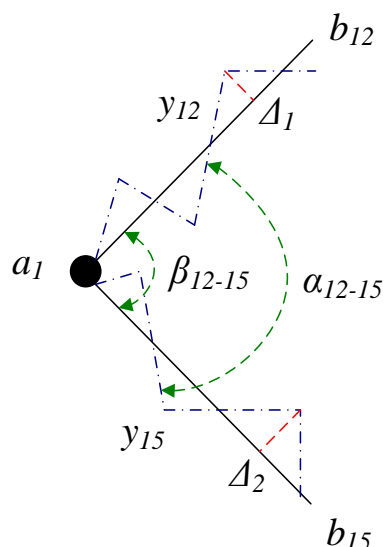


Рисунок 2.18 – Трассы кабельной канализации и их отображение ребрами графа

Угол  $\alpha_{12-15}$  меняется в диапазоне от  $0$  до  $180^\circ$ . Предположим, что соответствующее распределение подчиняется равномерному закону. В этом случае математическое ожидание величины рассматриваемого угла  $\alpha_{12-15}^{(1)} = 90^\circ$ .

Для оценки величин  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  следует использовать статистические данные по реальным проектам. По результатам исследования, проведенного в ЛО ЦНИИС [187], коэффициент  $\eta$ , который определяет отношение длин  $y_{ij}$  и  $b_{ij}$ , как правило, не превышает 1,5. Максимальные значения величин  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  обычно соответствуют ситуации, при которой линии  $y_{ij}$  и  $b_{ij}$  образуют треугольник. В таком треугольнике, изображенном на рисунке 2.19, сумма двух сторон равна  $y_{ij}$ . Используя известные геометрические соотношения, несложно показать, что максимальные значения  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  наблюдаются для равнобедренного треугольника, то

есть при  $x = 0,5\eta b_{ij}$ . Тогда величины  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  определяются как  $0,5b_{ij}\sqrt{\eta^2 - 1}$ . Для реальных значений коэффициентов  $\eta$  величины  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  составляют примерно 1,12.

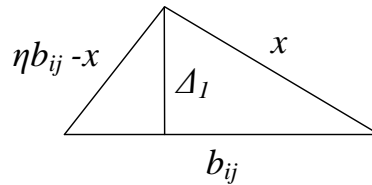


Рисунок 2.19 – Трассы кабельной канализации и их отображение ребрами графа

Эти простые результаты позволяют предложить модель, полезную для прогнозирования изоляции вершины графа. Данная модель приведена на рисунке 2.20. Она состоит из двух ребер, которые выходят из одной и той же вершины под углом  $90^\circ$ .

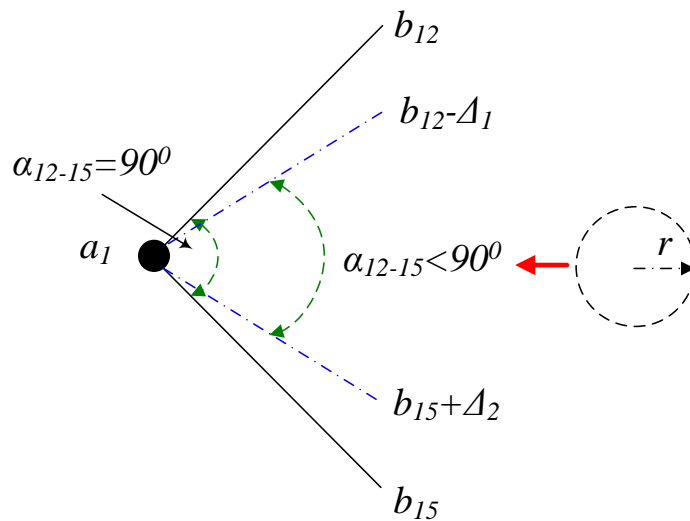


Рисунок 2.20 – Модель для расчета вероятности изоляции вершины графа

Предполагается, что "сближение" ребер происходит наихудшим образом – с разными знаками, как показано на рисунке 2.20 штрихпунктирными линиями. В этом случае угол  $\alpha_{12-15}$  всегда будет острым. Перемещая круг с радиусом  $r$  от конца ребра к его началу, можно получить оценку вероятности изоляции вершины. Причем такая оценка будет соответствовать "худшему случаю" с точки зрения реальных значений для структурных характеристик NGN.

После возникновения ЧС могут возникать проблемы с функционированием местных сетей. В некоторых случаях ЧС затрагивает работу обоих участков местных сетей – доступа и межстанционного. В последнее время, применительно к NGN, вместо термина "межстанционная сеть" чаще используется словосочетание "уровень агрегации". Для освещения этого вопроса воспользуемся первой моделью местной сети в виде графа с тремя вершинами – рисунок 2.21. Предлагаемая модель включает три УК, связанных между собой при помощи кольца. Для каждого УК изображены границы сетей доступа. Они показаны пунктирными линиями.

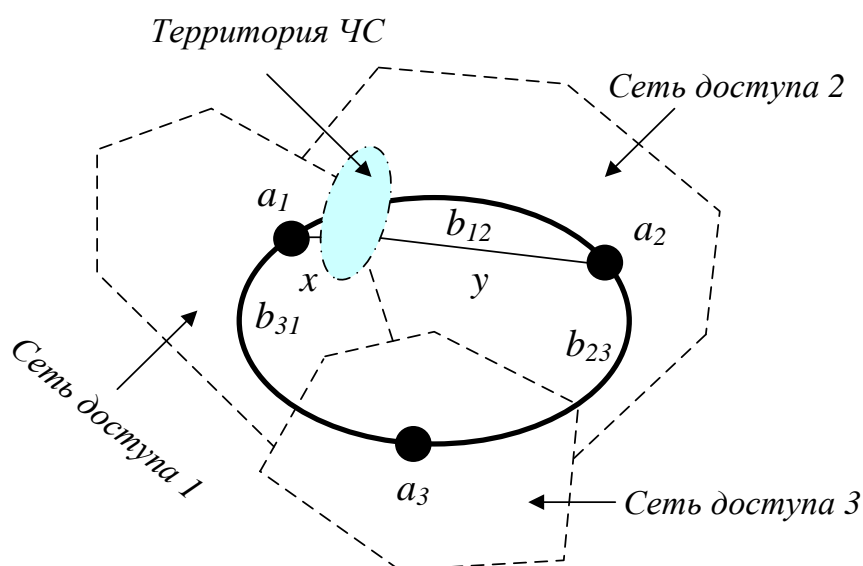


Рисунок 2.21 – Первая модель местной сети с тремя узлами коммутации

Предполагается, что границы территории ЧС (площадь, где средства электросвязи переходят в состояние "отказ") относительно вершин  $a_1$  и  $a_2$  удалены на  $x$  и  $y$  соответственно. Расположение эллипса, определяющего территорию ЧС, для рассматриваемой модели выбрано так, что он не покрывает ни одну из трех вершин. Именно по этой причине модель названа первой. Далее будет исследована вторая модель, в которой одна из вершин графа попадает внутрь эллипса.

Для предложенной модели характерны условия:  $y > x$  и  $x > 0$ . Отказ на межстанционном участке местной сети не происходит, так как все три вершины графа (УК) связаны ребрами  $b_{23}$  и  $b_{31}$  (трактами обмена IP-пакетами). В состоянии

"отказ" переходят фрагменты двух сетей доступа. Для исследуемой модели речь идет о сетях доступа первого и второго УК.

На рисунке 2.22 показана вторая модель. Она отличается тем, что  $x = 0$ , то есть эллипс накрывает вершину  $a_1$ , которая, следовательно, переходит в состояние "отказ". Это означает, что вся сеть доступа первого УК переходит в состояние "отказ".

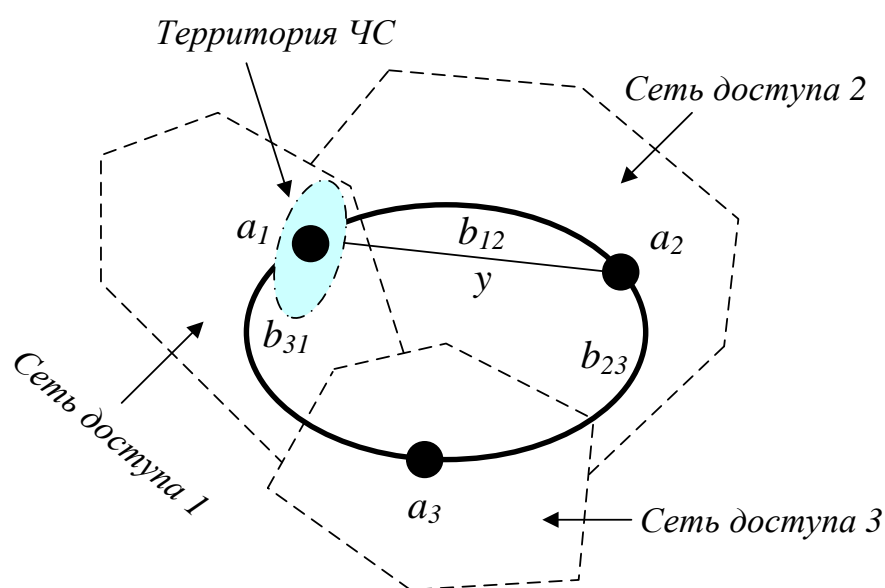


Рисунок 2.22 – Вторая модель местной сети с тремя узлами коммутации

Таким образом, не столь заметное смещение места расположения эллипса (территории ЧС) может вызвать следствие существенно большего масштаба. Подобный качественный анализ позволяет конкретизировать интервалы нарушений  $(v_0, v_1)$ ,  $(v_2, v_3)$  и  $(v_4, v_5)$ . Они были введены для третьего таксона (масштаб последствий) в классификации, показанной на рисунке 1.13 в первой главе диссертационной работы.

Интервал  $(v_0, v_1)$  уместно поставить в соответствие ситуации, когда состояние "отказ" возникает во фрагментах нескольких сетей доступа. Уровень  $v_0$  можно определить как выход из строя одного магистрального участка [56] сети доступа. Принципы проектирования кабельной канализации и сетей доступа [48, 184] позволяют сделать вывод, что в качестве уровня  $v_1$  следует выбрать три маги-

стральных участка сети доступа. Величины  $v_0$  и  $v_1$  несложно пересчитать в численность абонентов ТфОП, лишившихся связи. Каждый магистральный участок обеспечивает, в среднем, подключение до пятисот терминалов.

Продолжая аналогичные рассуждения, интервалу  $(v_2, v_3)$  следует поставить в соответствие те ситуации, когда отказы наступают во фрагментах местной сети. Логично использовать вторую модель, показанную на рисунке 2.22, для выбора уровня  $v_2$ . Он соответствует "выпадению" из кольца одного УК, то есть переходу в состояние "отказ" одной сети доступа целиком. Уровень  $v_3$  может быть задан как "отказ" 50% всех УК в составе местной сети. Такая ситуация может сложиться даже при сохранении работоспособности аппаратно-программных средств УК. Достаточно нарушить каждое кольцо, в двух или более местах.

Интервал  $(v_4, v_5)$  определяет массовые отказы. Уровень  $v_4$  соответствует отказу более 50% всех УК, образующих местную сеть. Если к тому же происходит отказ в обслуживании междугородного трафика, то такое состояние ССОП характеризуется уровнем  $v_5$ .

Численные значения величин  $v_i$  ( $i = \overline{0, 5}$ ) выбраны на основании имеющегося опыта по решению задач, прямо либо косвенно связанных с ликвидацией последствий ЧС. Характер и масштабы ЧС меняются. Значительно модифицируются свойства системы электросвязи при переходе к NGN, а также предъявляемые к ней требования. По этим причинам часть значений  $v_i$  будет меняться. Это обстоятельство следует учитывать при разработке алгоритмов управления NGN в период ликвидации последствий ЧС.

Вернемся к модели NGN в виде случайного графа, которая была приведена на рисунке 2.2. Границы территорий  $S_1$  и  $S_2$  можно определить при помощи геоинформационной системы [57]. Это позволяет точно очертить анклав  $S_i$ , в котором с высокой вероятностью произошли отказы элементов сети электросвязи. На рисунке 2.23 показана замена фигуры, иллюстрирующей эту территорию, кругом радиусом  $r_i$ . Выполнение работ, позволяющих восстановить связь у пользовате-

лей, расположенных в границах территорий  $S_1$  и  $S_2$ , определяется характером ЧС, а также доступными техническими средствами. Как правило, большинство из таких технических средств основано на мобильных комплексах связи и беспроводных технологиях, включая системы спутниковой связи.

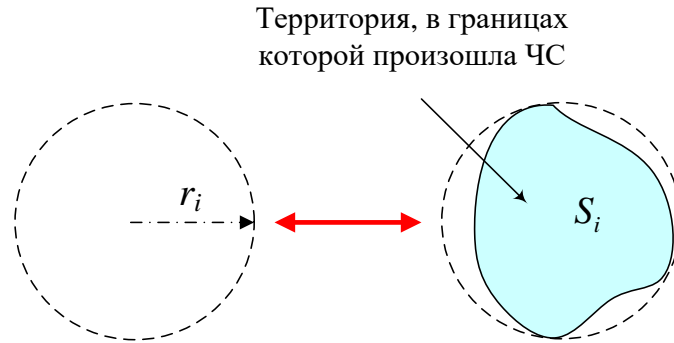


Рисунок 2.23 – Замена поверхности  $S_i$  кругом с радиусом  $r_i$

Предположим, что рациональное решение по восстановлению сети на первом (начальном) этапе заключается в подключении трех УК, каждый из которых связан одним трактом с действующим узлом. В терминах теории графов это эквивалентно подключению трех новых вершин ( $h_1, h_2, h_3$ ) с помощью трех ребер ( $l_{16}, l_{21}, l_{34}$ ), как показано на рисунке 2.24. Вершины вида  $h_i$  окрашены светлее, чем вершины исходного графа. Ребра вида  $l_{ij}$  изображены штрихпунктирными линиями.

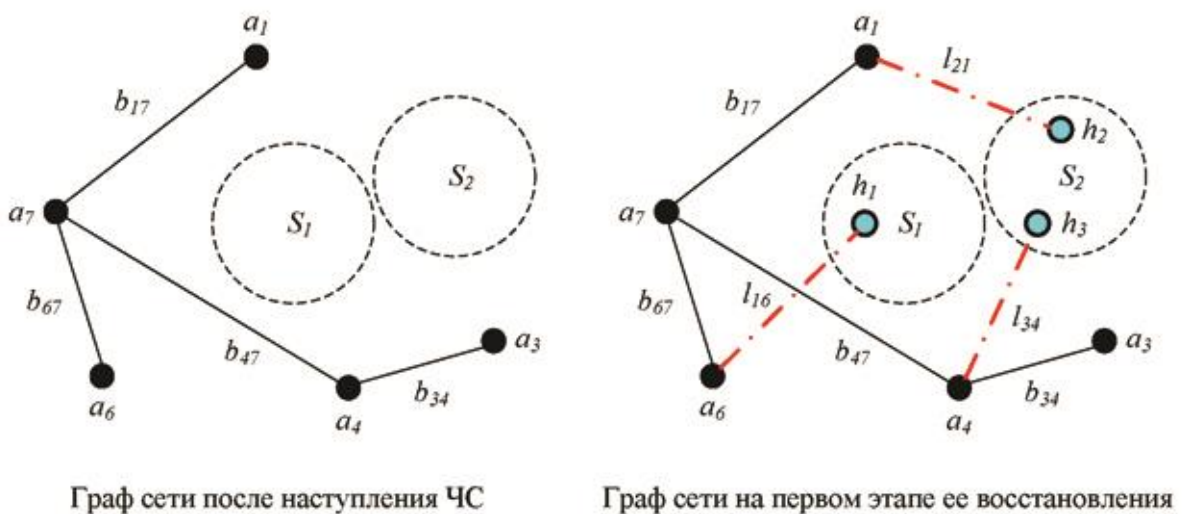
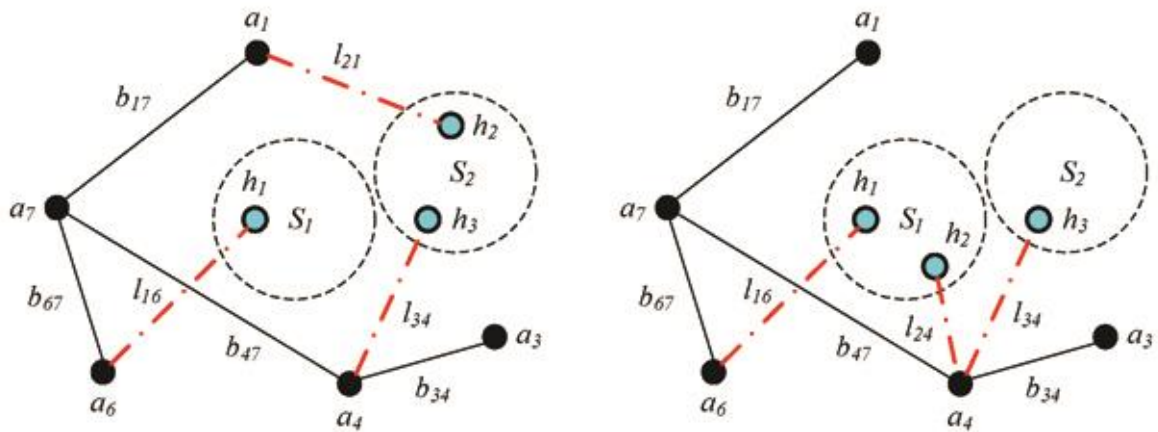


Рисунок 2.24 – Модель графа на первом этапе восстановления сети



Характер работ по ликвидации последствий ЧС может быть таким, что потребуется изменение структуры сети на втором этапе ее восстановления. На рисунке 2.25 приведен пример реализации подобных требований. Далее, без потери общности, предполагается, что второй этап восстановления сети будет заключительным.



Граф сети на первом этапе ее восстановления      Граф сети на втором этапе ее восстановления

Рисунок 2.25 – Модель графа на втором этапе восстановления сети

Суть второго этапа состоит в том, что узел  $h_2$  уже не нужен в границах территории  $S_1$ , но он полезен для проведения работ в границах территории  $S_2$ . Допустим, что перемещенный узел  $h_2$  включается в узел  $a_4$  с помощью тракта, который показан как ребро графа  $l_{24}$ .

После завершения последствий ликвидации ЧС структура сети может быть воссоздана в виде графа, который был показан в левой части рисунка 2.2. Если известно, что эта структура более не является устойчивой [64], то можно выполнить ее реконфигурацию на основе правил планирования сетей класса NGN [12, 187]. Далее, в основном, рассматривается задача воссоздания исходной структуры NGN.

Необходимо подчеркнуть различия в использовании узлов  $h_1, h_2, h_3$  и трактов  $l_{16}, l_{21}, l_{34}$  во времени с точки зрения задач по ликвидации последствий ЧС и задач по восстановлению собственно NGN. Однако для моделей в виде графа (по крайней мере, при исследовании структурных характеристик) эти различия не

столь важны. Рассматривается случайный граф, в котором в некий момент времени  $t_0$  происходит отказ части вершин и ребер. Далее выделяется период  $[t_0, t_1)$ , в течение которого осуществляется первый этап восстановления структуры графа. Затем с вероятностью  $p_{12}$  наступает период  $[t_1, t_2]$  – второй этап восстановления структуры графа. В точке  $t_2$  структура сети должна соответствовать всем требованиям, перечисленным в проектной документации на момент проведения последней реконструкции телекоммуникационной системы. Если  $p_{12} = 0$ , то  $t_1 \equiv t_2$ .

Если в качестве узлов вида  $h_i$  используются беспроводные системы, то приведенные выше модели можно рассматривать как гиперграфы или гиперсети [166, 225, 226]. В гиперграфе каждое ребро (в предложенных моделях –  $h_{ij}$ ) может соединять некое подмножество вершин. Целесообразность перехода к модели сети в виде гиперграфа обусловлена видом технологий, используемых для ликвидации последствий ЧС. Для анализа некоторых структурных характеристик сетей электросвязи различия между графами и гиперграфами не столь существенны (с точки зрения выбора модели NGN). Ряд аспектов работы NGN и сетей, основанных на беспроводных технологиях, лучше исследовать на моделях в виде гиперграфов или гиперсетей.

В большинстве публикаций по надежности сетей электросвязи вводится предположение об абсолютной надежности узлов коммутации. Для модели сети в виде графа это эквивалентно утверждению, что  $A_i \equiv 1$  при любых возможных значениях  $i$ . Для многих типов отказов такое допущение можно считать верным с учетом дублирования основных функциональных блоков УК [224]. Однако для отказов в условиях ЧС вполне вероятны переходы некоторых УК в состояние "отказ". Иными словами, необходим анализ ситуации, при которой  $A_i < 1$ . Это усложняет исследование ряда характеристик в части надежности и живучести сети. Для анализа структурных характеристик условие  $A_i < 1$  требует пересмотра традиционного подхода к исследованию ряда топологических особенностей эксплуатируемой сети.

Возвращаясь к модели сети, показанной на рисунке 2.7, отметим, что соответствующий граф образован  $N$  вершинами ( $N = 7$ ) и  $M$  ребрами ( $M = 11$ ). Поскольку граф является вероятностным, то он может находиться в одном из  $2^{N+M}$  состояний [52]. Для рассматриваемой модели количество возможных состояний равно 262144, что заметно усложняет анализ рассматриваемой модели. Очевидно, что модель сети крупного города или региона, для которой величины  $N$  и  $M$  следует оценивать десятками и даже сотнями, невозможно анализировать за счет перебора всех ее возможных состояний.

Ряд специалистов использует понятие "оптимальный граф" [53]. Для такого графа количество деревьев максимально. Согласно теореме Кэли [2] количество деревьев  $K_{TREE}$ , которые можно построить для графа из  $N$  пронумерованных вершин, определяется следующим соотношением:

$$K_{TREE} = N^{N-2}. \quad (2.26)$$

Под корневой вершиной дерева  $V_0$  логично понимать ту вершину графа, которая служит моделью коммутатора SoftSwitch в NGN. Одной из важных структурных характеристик сети класса NGN (в том числе – и для оценки параметров качества обслуживания трафика) следует считать ярус  $s$  для максимально удаленной вершины  $V_{REM}$ . Это расстояние между двумя вершинами  $V_0$  и  $V_{REM}$ ; оно обозначается далее как  $s = d(V_0, V_{REM})$ . Значение  $s$  определяется в процессе анализа конкретной топологии сети, которая, в свою очередь, выбирается в процессе разработки проектных решений.

Для задач, рассматриваемых в диссертации, теоретический и практический интерес связан с теми структурными характеристиками, которые позволяют судить о работоспособности сети в условиях наступления ЧС. По этой причине величину  $K_{TREE}$  следует оценивать при условии, что в составе узлов, не перешедших в состояние "отказ", остается хотя бы один коммутатор SoftSwitch или интеллектуальный шлюз [99], который способен выполнять основные функции управления сетью. Безусловно, с практической точки зрения следует учитывать возможность

перехода в состояние "отказ" сети в целом. Тогда для ликвидации последствий ЧС используются вновь вводимые (на некий период времени  $T_x$ ) средства связи, включая системы спутниковой связи [190] и, в особых случаях, беспилотные летательные аппараты [58]. При этом до истечения времени  $T_x$  средства ССОП не используются. Решение возникающих задач входит в компетенцию МЧС Российской Федерации. По этой причине ниже рассматриваются только те ситуации, когда в состоянии "работоспособность" находится хотя бы одно из устройств управления сетью – коммутатор SoftSwitch или интеллектуальный шлюз.

Предположим, что среди  $N$  вершин графа можно выделить  $N_c$  вершин, отображающих устройства управления. Очевидно, что в реальной сети всегда справедливо неравенство  $N_c \ll N$ . Все устройства управления размещаются на одной площадке с одним из узлов коммутации. Из этого следует, что анализу подлежит граф, в котором абсолютная надежность присуща не менее чем двум из  $N$  вершин. Будем считать, что для такого графа известно значение яруса  $s$ .

Как было отмечено выше, для ССОП (в том числе – и на этапе перехода к NGN) не существует общепринятого перечня нормируемых показателей, которые связаны со структурными характеристиками. С учетом задач, которым посвящена диссертация, следует сформировать особый перечень структурных характеристик. Он должен содержать все ключевые параметры системы электросвязи, важные для ее устойчивого функционирования в период времени от возникновения ЧС до ликвидации ее последствий.

## **2.5 Методика применения комплекса резервных технических средств**

Подключение резервных технических средств не может быть выполнено в сжатые сроки. В условиях отказа части оборудования и линейных сооружений ЛПР располагает некоторым временем  $t_v$  для выбора рационального пути исполь-

зования доступного запаса. Его следует считать восполняемым [176] в том смысле, что после ликвидации последствий ЧС запас почти полностью возвращается на склад. Словосочетание "почти полностью" указывает на тот факт, что в результате использования резервного активного оборудования зачастую будут полностью или частично разряжены аккумуляторные батареи. Проблемы с электропитанием следует проанализировать более подробно. Возникающие задачи и пути их решения рассматриваются в конце данного раздела.

Спрос на применение запаса описывается дискретной моделью. Более того, промежутки времени между ЧС в границах субъекта Российской Федерации, как правило, весьма длительны. По этой причине можно рассматривать формирование спроса на применение запаса как одноразовое событие. Если выполняются все регламентные работы, то запас представляет собой нестареющий продукт [176].

В настоящее время и объем запаса, и его номенклатура определяются директивно. По этой причине методика применения комплекса резервных технических средств может быть разработана как его рациональное применение для ЧС любого масштаба. В перспективе следует поставить задачу в иной форме: рассчитать запас с учетом возникновения ЧС наиболее вероятного характера.

Выбор стратегии для применения комплекса резервных технических средств относится к неструктурированным задачам принятия решений [207]. Тем не менее, для ЛПР будут очень полезны правила восстановления отказавших УК и транспортных ресурсов. Под принятием решения, согласно [207], понимается волевой акт формирования последовательности действий на основе анализа доступной информации в ситуации неопределенности.

Предположим, что в состав резервных технических средств входят  $k_3$  УК и  $l_3$  трактов обмена IP-пакетами. При этом тракты обмена IP-пакетами могут быть организованы за счет использования разных видов оборудования. Допустим, что количество отказавших УК и трактов обмена IP-пакетами для конкретной ЧС равно  $k_{ЧС}$  и  $l_{ЧС}$  соответственно. Если  $k_3 \geq k_{ЧС}$  и  $l_3 \geq l_{ЧС}$ , то задача управления запасами отсутствует. Во всех остальных случаях необходима разработка решений по

применению имеющихся резервов. Если  $k_3 \geq k_{\text{ЧС}}$  и  $l_3 < l_{\text{ЧС}}$ , то поставленная задача сводится к распределению дефицитных транспортных ресурсов. Если  $k_3 < k_{\text{ЧС}}$  и  $l_3 \geq l_{\text{ЧС}}$ , то необходимо распределить дефицитное оборудование УК. Худший случай возникает для неравенств такого вида:  $k_3 < k_{\text{ЧС}}$  и  $l_3 < l_{\text{ЧС}}$ . Очевидно, что решение задачи усложняется.

При некоторых ЧС отказы в сети связи обусловлены потерей внешнего питания на длительный период времени  $T_{\text{ЧС}}$ . При возникновении ЧС подобного рода все линейные сооружения могут оставаться в состоянии "работоспособность". В результате моделью сети связи служит граф  $G(a,b)$  с надежными ребрами и ненадежными вершинами. Модель, в определенном смысле, становится "зеркальной" по отношению к классической гипотезе об абсолютной надежности вершин графа и конечной надежности его ребер.

Мощность, потребляемая УК, при постоянном напряжении электропитающей установки может оцениваться величиной тока  $I_{\text{УК}}$ . Она зависит от следующих факторов:

- количество пользователей  $N_{\text{УК}}$ , которое обслуживается данным УК;
- объем оборудования  $V_{\text{УК}}$ , которое поддерживает дополнительные услуги (они не входят в состав функций, обязательных для УК).

Эту зависимость можно оценивать суммой, в которую входят коэффициенты пропорциональности  $\alpha_N$ ,  $\alpha_V$  и  $\alpha_Y$ :

$$I_{\text{УК}} \approx \alpha_N \cdot N_{\text{УК}} + \alpha_V \cdot V_{\text{УК}} + \alpha_Y \cdot Y_{\text{УК}}. \quad (2.27)$$

Принципы построения NGN и конструктивные особенности соответствующих УК таковы, что снижение расхода тока может быть достигнуто только за счет минимизации слагаемого  $\alpha_V \cdot V_{\text{УК}}$ . Получаемый эффект, как показал анализ ряда проектных решений, не превышает 10%. Следовательно, возникает задача увеличения времени автономной работы УК в условиях длительного перерыва внешнего электроснабжения телекоммуникационной системы.

Для решения данной задачи необходимо получить информацию от компаний, ответственных за снабжение электроэнергией, об ожидаемом значении  $T_{\text{ЧС}}$ . Предположим, что доступны оценки среднего значения  $T_{\text{ЧС}}^{(1)}$  и 95-го квантиля  $t_{0,95}$  длительности перерыва внешнего электроснабжения. Знание среднего значения  $T_{\text{ЧС}}^{(1)}$  позволяет вычислить математическое ожидание запаса  $D_{\text{чс}}^{(1)}(i)$  для бесперебойной работы  $i$ -го УК, если известно среднее время работы его собственной электропитающей подсистемы  $T_{\text{Э}}^{(1)}(i)$ :

$$D_{\text{чс}}^{(1)}(i) = T_{\text{ЧС}}^{(1)} - T_{\text{Э}}^{(1)}(i). \quad (2.28)$$

Источники электроэнергии, образующие запас, могут быть восстанавливаемыми (перезаряжаемыми) или одноразовыми. В любом случае для выбранного типа элемента питания известно среднее время его работы  $t_{\text{Э}}^{(1)}$ . Тогда для  $i$ -го УК количество необходимых источников  $g(i)$  определяется как округленный (до большего целого значения) результат деления  $D_{\text{чс}}^{(1)}(i)$  на  $t_{\text{Э}}^{(1)}$ :

$$g(i) = \left\lceil \frac{D_{\text{чс}}^{(1)}(i)}{t_{\text{Э}}^{(1)}} \right\rceil. \quad (2.29)$$

Величина  $g(i)$  оценивается соотношением (2.29) по критерию, который основан на математическом ожидании перерыва внешнего электроснабжения. Если учитывать риски из-за более длительного перерыва, то в качестве критерия следует выбрать квантиль  $t_{0,95}$ . В этом случае в формуле (2.28) необходимо заменить величину  $T_{\text{ЧС}}^{(1)}$  значением  $t_{0,95}$ . На практике могут быть использованы и другие значения квантиля (в частности,  $t_{0,99}$ ). Такое решение может оказаться необходимым для тех УК, работоспособность которых представляется особо важной с точки зрения ликвидаций последствий ЧС или по иным причинам. Применение резервных источников электропитания должно осуществляться в соответствии со стратегией проведения восстановительных работ.

Стратегию проведения восстановительных работ следует разработать с учетом приоритетов (очередности), назначаемых разным компонентам NGN. Всем

УК, количество которых равно  $N$ , несложно назначить такой приоритет, основываясь на трех характеристиках:

- уровень иерархии NGN, на котором расположен УК;
- количество обслуживаемых пользователей или трактов обмена IP-пакетами;
- важность определенных групп пользователей с точки зрения основных процессов по обеспечению жизнедеятельности субъекта Российской Федерации.

Обозначим количество уровней приоритета через  $M$ . В результате каждому УК соответствует пара  $(i, k)$ . В этой паре  $i$  – номер УК в составе сети ( $i = \overline{1, N}$ ), а  $k$  – назначенный уровень приоритета ( $k = \overline{1, M}$ ). Некоторым узлам может быть приписан один и тот же уровень приоритета. Следовательно,  $M \leq N$ .

Аналогично, всем трактам обмена IP-пакетами, количество которых равно  $X$ , назначается приоритет, основываясь на трех характеристиках:

- уровень иерархии NGN,
- пропускная способность;
- важность с точки зрения скорейшего восстановления целостности телекоммуникационной системы.

Обозначим количество уровней приоритета через  $Y$ . В результате каждому тракту обмена IP-пакетов соответствует пара  $(j, l)$ . В этой паре  $j$  – номер тракта обмена IP-пакетов в составе сети ( $j = \overline{1, Y}$ ), а  $l$  – назначенный уровень приоритета ( $l = \overline{1, Y}$ ). Некоторым трактам может быть приписан один и тот же уровень приоритета. Это значит, что  $Y \leq X$ .

В результате влияния некоторых разрушающих воздействий не образуется фрагментов NGN, в которых какой-либо УК и инцидентные ему тракты обмена IP-пакетами отказали совместно. Тогда процессы восстановления УК и транспортных ресурсов могут выполняться независимо друг от друга – в полном соответствии с назначенными приоритетами.



Если отказавший  $i$ -й УК, имеющий  $k$ -й приоритет, стал изолированным (не связан с NGN хотя бы одним трактом обмена IP-пакетами), то процесс восстановления транспортных ресурсов меняется. Для  $i$ -го УК, выбранного из общего списка для восстановления, определяется тракт обмена IP-пакетами, который должен обеспечить подключение к NGN. Такая процедура эквивалентна пересчету приоритетов для трактов обмена IP-пакетами.

Оценка объема и состава резервного комплекса для каждого субъекта Российской Федерации или его части зависит от прогнозируемых последствий ЧС. Предположим, что такие оценки для некоего объекта "X" получены из соответствующего подразделения МЧС. Если подобных оценок нет, то следует организовать проведения необходимых исследований. До получения результатов можно воспользоваться оценками, полученными для аналогичного объекта. В тех случаях, когда выбор аналога не представляется возможным, необходимо организовать коллективную экспертизу [154] возможных последствий ЧС с точки зрения разрушающих воздействий на телекоммуникационную систему.

Любая из перечисленных выше процедур позволяет получить точечные или интервальные оценки количества отказавших УК и трактов обмена информацией –  $N_o$  и  $M_o$  соответственно. Точечные оценки можно рассматривать как средние значения интервальных оценок. Последние заданы в виде ряда положительных целых чисел на конечном отрезке их возможных изменений –  $[N_o^{\min}, N_o^{\max}]$  и  $[M_o^{\min}, M_o^{\max}]$  соответственно.

Для максимально быстрого восстановления телекоммуникационной системы объем резервного комплекса должен быть выбран по значениям  $N_o^{\max}$  и  $M_o^{\max}$ . Такое решение не всегда возможно по экономическим соображениям. По этой причине объем резервного комплекса можно наращивать для значений  $N_o^{\max}$  и  $M_o^{\max}$ , начиная с уровней, определяемых минимальными числами  $N_o^{\min}$  и  $M_o^{\min}$ . Оценка запаса для гарантированного электропитания осуществляется по соотно-

шениям (2.27) – (2.29). Возможный алгоритм проведения восстановительных работ предложен в [120].

## 2.6 Дополнительные аспекты анализа надежности и живучести телекоммуникационной системы

В состав телекоммуникационной системы, помимо УК, входят компоненты, которые непосредственно не задействованы в процесс установления соединений. Такой подход к построению телекоммуникационных систем стал применяться с момента формирования концепции "Интеллектуальная сеть" [22]. Эта концепция предусматривает разделение функций коммутации и поддержки дополнительных услуг, в состав которых следует включить и ряд функциональных возможностей телекоммуникационной системы. Из этого следует, что все активные элементы в составе сети электросвязи можно разделить на две группы численностью  $N_1$  и  $N_2$ . Выход из строя  $i$ -го активного элемента при условии, что  $i \in N_1$ , порождает проблемы с установлением соединений. Если  $i \in N_2$ , то возникающие проблемы связаны с другими аспектами функционирования телекоммуникационной системы.

Величину  $N_2$ , в свою очередь, необходимо разделить на две подгруппы –  $n_{21}$  и  $n_{22}$ . Очевидно, что  $n_{21} + n_{22} = N_2$ . В первую подгруппу входят те элементы, без которых телекоммуникационная система не может считаться работоспособной. Их типичными примерами служат аппаратно-программные средства, поддерживающие Систему-112 и функции СОРМ. Во вторую подгруппу входят активные элементы, которые в период действия ЧС не критичны к задачам функционирования телекоммуникационной системы. Таким образом, под количеством

элементов NGN, для которых необходимо предусмотреть меры по повышению надежности, следует понимать сумму  $N_1 + n_{21}$ .

В статье [82], а также в ряде других публикаций, вводится термин "стойкость". Под стойкостью понимается способность сложной системы противостоять внешним воздействиям и функционировать в штатном режиме на начальном этапе ЧС. Этот этап занимает время от начала ЧС до момента вхождения сложной системы в критическую область ее функционирования. Иными словами, стойкость – это живучесть сложной системы в докритической области функционирования под влиянием внешних ненормативных воздействий [82].

Целесообразность введения термина "стойкость" определяется характером докритической области функционирования NGN. Эта область, в свою очередь, зависит от типа ЧС и ее масштабов. По этой причине введению термина "стойкость" и определению соответствующих показателей должны предшествовать междисциплинарные исследования. Тенденции изменения количества ЧС и их масштабов таковы, что анализ поведения телекоммуникационной системы в докритической области ее функционирования становится очень актуальным. Не исключено, что введение термина "стойкость" и нормирование ряда дополнительных параметров надежности окажутся весьма полезными.

В статье [174] проблема стойкости ассоциируется с минимальной величиной стоимости телекоммуникационной системы, обеспечивающей ее живучесть. Численной оценкой стойкости считается наименьшая средняя стоимость создания нового элемента связности. По всей видимости, такой подход правомерен, но вряд ли его можно считать универсальным.

## 2.7 Выводы по главе 2

1. Модель сети класса NGN, предназначенная для исследования характеристик надежности и живучести, в зависимости от вида поставленной задачи, может

быть представлена графом, случайным графом или гиперсетью. При этом формирование модели должно осуществляться с учетом реальной топологии NGN, реализованной в результате ее строительства.

2. В качестве основных показателей надежности NGN и телекоммуникационной системы в целом предложено использовать коэффициенты готовности узлов коммутации и трактов обмена IP-пакетами, а также параметры времени восстановления этих устройств. Важными характеристиками модели NGN становятся степени вершин графа, который отображает узлы коммутации, и кратность ребер, служащих средством описания трактов обмена IP-пакетами. Приоритетный этап восстановительных работ при нарушении целостности телекоммуникационной системы подразумевает восстановление связности, которое, в свою очередь, предусматривает построение, как минимум, древовидной топологии NGN.

3. Исследование структурных характеристик NGN показало, что обеспечение заданных показателей надежности и качества ее функционирования может быть достигнуто только при вводе в состав телекоммуникационной системы нового элемента. Он назван Интеллектуальным шлюзом (резервным контроллером). Вычисление коэффициента готовности между интерфейсами пользователь-сеть (одной из важнейших характеристик надежности NGN) доказало, что применение Интеллектуальных шлюзов – эффективный путь обеспечения целостности и устойчивости функционирования телекоммуникационной системы. Требования к оборудованию Интеллектуального шлюза защищены патентом.

4. Выражения для оценки коэффициентов готовности различных фрагментов NGN могут быть получены на основании моделей, которые отражают специфику пакетных сетей и особенности реализации их топологии. В этой главе диссертационной работы получены все соотношения для оценки коэффициентов готовности фрагментов NGN, необходимые для проведения дальнейших исследований. Особое внимание уделено надежности сети доступа, Показано, что организация кольцевых топологий на уровне магистрального участка сети доступа – с учетом принятой ранее практики построения кабельной канализации – не обеспечи-

вает заданный коэффициент готовности. Для резервирования средств доступа следует сочетать проводные и беспроводные технологии.

5. Анализ структурных характеристик NGN, выполненный с учетом особенностей размещения узлов коммутации и трактов обмена IP-пакетами, позволил сформулировать общие принципы проведения восстановительных работ в случае нарушения целостности телекоммуникационной системы. Эти принципы основаны на первоначальном восстановлении связности с последующими работами по реализации рациональной структуры NGN. При проведении мероприятий такого рода следует рассматривать возможность улучшения структуры NGN, выбранной при формировании проектных решений.

6. Для проведения восстановительных работ в ЧС используется комплекс резервных технических средств. Предлагаемая методика использования этого комплекса основана на заранее разработанной системе приоритетов, устанавливающей очередность восстановления узлов коммутации и трактов обмена IP-пакетами. В результате разработки методики, а также анализа статистики и прогнозов чрезвычайных ситуаций, составлены требования к перспективному комплексу резервных технических средств.

7. Изучение статистических данных об отказах свидетельствует, что их значительная часть обусловлена прерыванием внешнего энергоснабжения на длительный срок. Для минимизации последствий таких отказов разработана методика расчета запасов средств электропитания, который должен обеспечить работоспособность узлов коммутации NGN.

### **3. Характеристики работы узла коммутации в составе сети связи следующего поколения при чрезвычайных ситуациях**

#### **3.1 Особенности работы узла коммутации при ЧС**

При возникновении ЧС в ряде случаев не фиксируются отказы УК и трактов обмена информацией. Иная ситуация характерна для обслуживаемого трафика. В частности, анализ функционирования СДЭ после возникновения ЧС [95] показал, что изменения трафика становятся весьма существенными и заметно влияют на качество предоставляемых услуг.

Такая же ситуация складывается и в других видах сетей электросвязи. В информационном докладе, подготовленном фирмой Mason Communications ([http://www.sagatelecom.ru/encyclopedia/protocol/detail.php?SECTION\\_ID=28&ID=22](http://www.sagatelecom.ru/encyclopedia/protocol/detail.php?SECTION_ID=28&ID=22)), приведены сведения об изменении трафика для нескольких масштабных ЧС:

- При атаке на Пентагон (Вашингтон, 11 сентября 2001 года) трафик в сетях Оператора связи Verizon, генерируемый абонентами фиксированной телефонии, возрос – по сравнению с обычным для США уровнем – в полтора-два раза. Компания Cingular Wireless, которая является вторым по количеству обслуживаемых абонентов Оператором сотовой связи, отметила в своей вашингтонской сети четырехкратное увеличение количества вызовов.
- В торговом центре Muurmanni, расположенном вблизи столицы Финляндии Хельсинки, 11 октября 2002 года произошел взрыв бомбы, унесший несколько человеческих жизней. Когда тысячи людей попытались одновременно дозвониться до экстренных оперативных служб по номеру 112 до своих друзей и родственников, работа сетей GSM, обслуживавших этот район, была полностью блокирована. Это серьезно помешало про-

ведению спасательных операций, так как организовать размещение раненых в больницах можно было только при помощи сотовой связи. Сложности возникли и у пожарных, которые для связи с другими службами ЧС пользовались каналами GSM.

- При землетрясении в Кобе (Япония, январь 1995 года) в первый день трафик превысил пиковое значение в 50 раз, выйдя за рамки возможностей телекоммуникационной системы. Ведущий оператор внутренней связи Японии, корпорация NTT, заблокировала 95% всех входящих вызовов, чтобы обеспечить связью полицейские участки, правительственные организации и телефоны общего доступа.

Эти данные свидетельствуют об изменении условий функционирования УК в составе сети любого назначения. Причем диапазоны возможных изменений могут быть весьма существенными. Данный факт актуализирует исследования УК как классической СМО, функционирующей при резком росте трафика. Для проведения исследований необходимо, в первую очередь, разработать модель УК в составе NGN.

### 3.2 Модели узла коммутации NGN

Для разработки модели узла коммутации NGN следует конкретизировать "черный ящик", показанный на рисунке 1.10. В первой главе диссертационной работы были определены процессы  $A(t)$ ,  $B(t)$ ,  $C(t)$  и  $D(t)$ , когда предложенная модель используется для изучения УК как однолинейной СМО. Одна из особенностей УК заключается в том, что IP-пакеты (заявки в терминологии теории телетрафика) могут теряться. На эту возможность указывает процесс  $P(t)$ , который не был показан на рисунке 1.10 в составе "черного ящика".

Модель УК, используемая в этой главе диссертационной работы, приведена на рисунке 3.1. Основные свойства процессов  $A(t)$ ,  $B(t)$  и  $C(t)$  были приведены в

тексте после рисунка 1.10. Исследование процесса  $P(t)$  будет ограничено анализом вероятности потери заявок, так как только этот параметр нормируется в качестве одного из показателей качества обслуживания мультисервисного трафика в NGN.

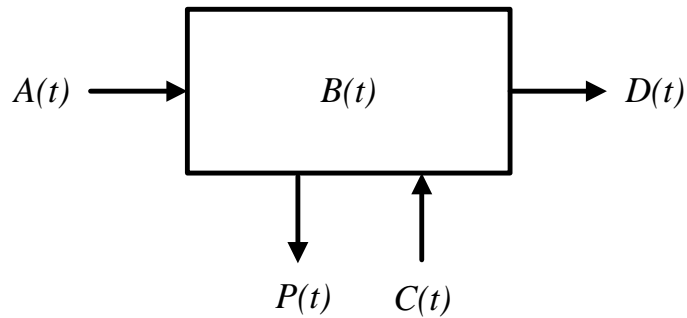


Рисунок 3.1 – Модель узла коммутации как системы массового обслуживания

Для формирования модели УК в виде СМО, в первую очередь, необходимо определить ФР  $A(t)$  и  $B(t)$ , а также описать три атрибута исследуемой системы: количество обслуживающих приборов, объем мест для ожидания заявок в очереди и дисциплину обслуживания. Эту задачу следует рассматривать как разумный компромисс между возможностью исследования предлагаемой модели и ее адекватностью реальным процессам обслуживания трафика в УК. По этой причине все количественные и качественные характеристики модели должны быть приняты после детального анализа процесса функционирования УК в период действия ЧС.

Процесс  $A(t)$  на входе СМО связан с одним из важнейших понятий в теории телетрафика – потоком заявок [70]. Под заявкой понимается то, что должно быть обслужено. В диссертационной работе, если не сказано иное, под заявкой понимается IP-пакет. Описание процесса на входе модели – это выбор адекватной ФР, обычно обозначаемой в технической литературе как  $A(t)$ .

Термин "обслужено" вводится как универсальное обозначение операций, которые могут потребоваться для решения поставленной задачи (например, обработать IP-пакет в УК или передать его через транспортную сеть). В любом случае процесс обслуживания представим ФР  $B(t)$ . Она позволяет найти все необходимые числовые характеристики соответствующей случайной величины [25].



По ряду причин заявка может быть не обслужена. Типичный пример для IP-сети – переполнение буферной памяти для ожидания начала обработки в УК. Если заявка не может быть обслужена, то она покидает СМО. Соответствующий процесс описывается ФР вида  $P(t)$ . Заявки, успешно обслуженные в СМО, формируют поток, представимый ФР  $D(t)$ . Этот поток называют выходящим [70].

Считается, что поток IP-пакетов наиболее удачно представляется распределениями с так называемыми "тяжелыми хвостами" [84, 87, 206]. Подобное утверждение означает, что возможны (хотя и маловероятны) длительные промежутки времени между поступлениями пакетов. Такие ситуации не фиксируются при измерении потока IP-пакетов после наступления ЧС. С другой стороны, большие значения  $C_A$  – коэффициента вариации длительности тех интервалов, которые определяют моменты поступления соседних заявок (IP-пакетов), типичны для трафика в период ЧС. Следовательно, для анализа модели лучше использовать распределения без "тяжелых хвостов", но со сравнительно большими значениями величины  $C_A$  [132].

Такой подход не отменяет целесообразности анализа трафика, типичного для ЧС, с точки зрения его фрактальных свойств. Для этого были выбраны фрагменты пакетной сети, обрабатывающие трафик с высокой интенсивностью потока IP-пакетов. Характеристики измеряемого трафика максимально близки к тем атрибутам, которые наблюдаются в период действия ЧС. Наличие самоподобия выявляется за счет оценки показателя Херста –  $H$  [206]. Значение данного параметра связано с величиной коэффициента вариации  $C_A$  [8]. Следовательно, оценка показателя Херста позволяет выбрать тот диапазон изменения величины  $C_A$ , который интересен с практической точки зрения.

Результаты измерения трафика, типичного для ЧС, приведены в Приложении Б. Там же содержатся и положения, касающиеся выводов о выборе тех диапазонов изменения коэффициента вариации  $C_A$ , которые гарантируют достоверную оценку исследуемых характеристик в сети NGN.

Время обслуживания IP-пакетов в узле обычно полагают постоянной величиной или используют закон распределения с небольшим коэффициентом вариации [137, 219, 228]. Подобное допущение объясняется двумя соображениями. Во-первых, в некоторых УК обработка IP-пакетов осуществляется аппаратными средствами. Тогда время обслуживания заявок становится постоянным. Во-вторых, алгоритм обработки IP-пакетов не предусматривает применение сложных процедур, различающихся по времени их выполнения. Этот факт также позволяет считать время обслуживания заявок постоянной величиной или близкой к ней.

УК (маршрутизатор) представляет собой однолинейную СМО. Слово "однолинейная" вошло в обращение специалистов по теории телетрафика в то время, когда основная решаемая задача заключалась в расчете количества каналов между смежными УК [202]. Это слово означает, что функции обслуживания в СМО выполняет одно устройство. В данном случае таким устройством служит УК (маршрутизатор).

Количество мест для ожидания в очереди всегда конечно. В современных УК нормируется очень малая вероятность потери заявок – не более  $10^{-3}$  [236]. Тогда количество мест для ожидания в очереди принимается за бесконечность (при условии, что УК рассчитан и спроектирован правильно), что позволяет заметно упростить аналитическое исследование модели [187]. При этом возникающие ошибки не превышают доли процента для трафика, который обслуживается в нормальных условиях эксплуатации телекоммуникационной системы. При перегрузке гипотезу о неограниченном количестве мест для ожидания в очереди использовать нельзя. Ошибки в оценке характеристик СМО резко возрастают.

Современные УК, используемые в составе NGN, позволяют ввести приоритетное обслуживание IP-пакетов для разных видов трафика или групп пользователей [6]. Используются относительные приоритеты [45]. Это означает, что поступающая заявка более высокого приоритета не прерывает процесс обслуживания заявки более низкого приоритета, но, после завершения процесса обслуживания, первой становится заявка более высокого приоритета. Дисциплина обслуживания

"первой пришла – первой обслужена" также может использоваться в УК. Она представляет собой частный случай приоритетного обслуживания, когда все заявки рассматриваются как идентичные.

Для краткого обозначения СМО была введена классификация, которую предложил Д. Кендалл [70]. Известна также классификация А.А. Боровкова [17], но она редко используется в прикладных исследованиях, хотя представляется весьма удачной. Первоначально классификация Кендалла включала только три позиции. Предлагаемая модель УК обозначается в ней следующим образом:  $GI/G/1$ . Первый символ указывает на произвольный характер распределения  $A(t)$ . Этот же символ во второй позиции используется для обозначения того факта, что распределение  $B(t)$  также может быть любым. Правда, чаще всего время обслуживания заявок близко к постоянному. Цифра "1" в конце нотации определяет количество обслуживающих приборов.

Для отображения дополнительной информации трехсимвольная классификация Кендалла была дополнена. В ряде зарубежных источников вводится еще три символа [230]. В отечественной технической литературе предложена классификация, основанная на пяти символах [183], которая и будет использоваться далее. Информация об исследуемой СМО может быть представлена в такой форме:

$$GI/G/1/r/f_j. \quad (3.1)$$

Величина  $r$  определяет количество мест для ожидания в очереди. Обычно она задается целым положительным числом. Если  $r = 0$ , то модель представляет собой СМО с явными потерями [133], в которой формирование очереди не предусматривается. Если в четвертой позиции стоит математический символ " $\infty$ ", то предполагается возможность сколь угодно большой очереди. Обозначение " $f_j$ " принято для идентификации дисциплины обслуживания заявок. Если  $j = 0$ , то обслуживание заявок производится без приоритетов. Если  $j = 1$ , то заявки выбираются из очереди на обслуживание с относительными приоритетами.

Модель (3.1) и ее разновидности является основной СМО, исследуемой в диссертационной работе. Ряд оценок можно получить за счет упрощения этой мо-

дели. В частности, наиболее принятым упрощением служит модель  $M / M / 1 / \infty / f_0$ . Символ "M" в первой позиции обозначает, что распределение  $A(t)$  является экспоненциальным. Этот же символ во второй позиции указывает на тот факт, что экспоненциальному закону подчиняется распределение  $B(t)$ . Для такой упрощенной модели легко получить формулы для расчета двух важных показателей качества обслуживания мультисервисного трафика, нормированных в рекомендации МСЭ-Т Y.1541 [236]:

- задержка переноса IP-пакетов –  $IPTD$  ;
- вариация задержки IP-пакетов –  $IPDV$  .

Модель  $M / M / 1 / \infty / f_0$  не позволяет оценить показатель  $IPLR$  – долю потерянных IP пакетов. Дело в том, что рассматриваемое упрощение модели предполагает возможность формирования бесконечной очереди для ожидания начала обслуживания. Заметим, что показатель  $IPER$  (доля искаженных IP-пакетов), упомянутый в [236] отдельно не анализируется. Примем допущение, что все искаженные IP-пакеты теряются, что позволяет исследовать только показатель  $IPLR$  (он анализируется в четвертой главе диссертационной работы).

Ряд полезных оценок может быть получен для более сложной модели вида  $GI / M / 1 / \infty / f_0$ . Она позволяет исследовать СМО с произвольным видом входящего потока заявок. Для некоторых моделей вида  $GI / M / 1 / \infty / f_0$  также несложно получить оценки  $IPTD$  и  $IPDV$ . Это возможно только при условии, что для функции  $A(t)$  существует преобразование Лапласа [47].

Величина  $IPTD$  представляет собой математическое ожидание (среднее значение) времени задержки заявок. Чаще всего математическое ожидание (первый начальный момент) этой величины обозначается как  $S^{(1)}$ . Для конкретизации исследуемого объекта вводятся нижний индекс и/или символ в круглых скобках. Например, запись  $S_k^{(1)}(i)$  может обозначать, что речь идет о средней задержке заявок  $k$  – го относительного приоритета для  $i$  – го элемента модели.

Для вычисления значения  $IPDV$ , согласно определению из рекомендации МСЭ-Т Y.1541 [236], необходимо знать две величины:

- $p$ -квантиль распределения времени задержки заявок  $t_p$ , который в настоящее время нормируется при  $p = 0,999$ ;
- минимальное время  $t_{\min}$ , за которое IP-пакет может быть доставлен на рассматриваемом участке сети.

После определения этих двух величин показатель  $IPDV$  вычисляется как их разность:

$$IPDV = t_p - t_{\min}. \quad (3.2)$$

Оценка показателя  $IPLR$  осуществляется как отношение количества потерянных IP-пакетов к общему числу переданных IP-пакетов. Причина потери IP-пакетов в данном случае не существенна.

Исследование характеристик функционирования УК логично начать с более простых моделей. Результаты исследования приведены в следующем разделе данной главы диссертационной работы.

### 3.3 Исследование упрощенных моделей узла коммутации NGN

Одно из свойств обеих упрощенных моделей УК состоит в том, что минимальное время задержки IP-пакетов равно нулю. Это значит, что величина  $IPDV$  равна квантилю  $t_p$ . Искомые показатели  $IPTD$  и  $IPDV$  для модели  $M / M / 1 / \infty / f_0$  определяются соотношениями, приведенными, например, в [70]. Их можно представить в такой редакции [101]:

$$IPTD = \frac{1}{\mu - \lambda}, \quad IPDV = t_p = \frac{-\ln(1-p)}{\mu - \lambda}. \quad (3.3)$$

Здесь  $\mu$  – интенсивность обслуживания в системе телетрафика, определяемая как  $[B^{(1)}]^{-1}$ .  $B^{(1)}$  – это среднее время обработки IP-пакета,  $\lambda$  – интенсивность потока IP-пакетов, равная  $[A^{(1)}]^{-1}$ . Величина  $A^{(1)}$  – это среднее время между моментами поступления IP-пакетов,  $p$  – вероятность, для которой нормировано значение  $IPDV$ . В теории телетрафика для систем с ожиданием вводится величина загрузки  $\rho$  [70]:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}. \quad (3.4)$$

Для устойчивой работы системы телетрафика должно выполняться условие  $\rho < 1$ . Введем меру  $\xi$ , равную разности  $IPDV$  и  $IPTD$ :

$$\xi = \frac{-\ln(1-p)-1}{\mu(1-\rho)}. \quad (3.5)$$

Физический смысл меры  $\xi$  может трактоваться как различие вариации (джиттера) и среднего значения времени задержки IP-пакетов. Очевидно, что при  $\rho \rightarrow 1$  величина  $\xi$  стремится к бесконечности. Этот факт указывает на большой разброс тех моментов времени, которые характеризуют исследуемый случайный процесс – задержку IP-пакетов. Очевидно, что здесь качество обслуживания трафика резко снижается. Причем, числитель выражения (3.5) является константой, значение которой не меняет сути исследуемого процесса. Это позволяет поменять квантиль, нормированный в [236] для  $p = 0,999$ , на другой. В частности, для получения оценок методами имитационного моделирования обычно используют 95%-й квантиль.

Для модели  $M / M / 1$  вычисление нового значения квантиля  $IPDV_2$ , заданного для вероятности  $p_2$ , осуществляется по нормам, определенным для пары  $IPDV_1$  и  $p_1$ :

$$IPDV_2 = IPDV_1 \frac{\ln(1-p_2)}{\ln(1-p_1)}. \quad (3.6)$$

Если представить квантиль  $t_p$  величиной, равной

$$t_p = IPTD + \vartheta\sigma, \quad (3.7)$$

где  $\sigma$  – это стандартное отклонение, то значение коэффициента  $\vartheta$  будет определяться следующим образом:

$$\vartheta = -1 - \ln(1 - p). \quad (3.8)$$

В частности, для нормируемого в рекомендации МСЭ-Т Y.1541 значения  $p = 0,999$  величина  $\vartheta \approx 5,908$ . При переходе к значению  $p = 0,95$  получаем:  $\vartheta \approx 1,996$ .

Способ оценки показателя  $IPDV$  через среднее значение и стандартное отклонение представляется перспективным, так как он позволяет существенно упростить процесс вычисления характеристик, определяющих качество обслуживания трафика на основании статистической информации. Она обычно представляется в виде гистограммы, в которой время задержки  $t_i$  встречается с вероятностью  $q_i$ . Тогда величины  $IPTD$  и  $\sigma$  рассчитываются по правилам нахождения моментов случайной величины [25]:

$$IPTD = \sum_{\{I\}} q_i t_i, \quad \sigma = \sqrt{\sum_{\{I\}} q_i t_i^2 - \left(\sum_{\{I\}} q_i t_i\right)^2}. \quad (3.9)$$

Соотношения, приведенные выше, малоэффективны для исследования сети NGN при существенном росте трафика. Они полезны с точки зрения выявления ряда закономерностей, которые, как будет показано ниже, справедливы для более сложных моделей, используемых для адекватного описания процессов обслуживания пакетного трафика при его резком росте.

Для оценки поведения УК в составе NGN при существенном росте трафика лучше использовать модель вида  $GI / M / 1 / \infty / f_0$ . Допущение об экспоненциальном законе распределения времени обслуживания заявок позволяет получить верхние границы для большинства параметров длительности задержки IP-пакетов. Для модели  $GI / M / 1 / \infty / f_0$  в [70] приведены соотношения, позволяющие рассчитать необходимые характеристики СМО. Для потока IP-пакетов на входе модели следует использовать ряд законов распределения с "тяжелыми хвостами"

или просто со значением  $C_A > 1$ . Из возможных распределений надо выбирать лишь те, у которых существует преобразование Лапласа  $\alpha(s)$  от плотности функции  $A(t)$ .

Для исследования модели вида  $GI / M / 1 / \infty / f_0$  необходимо найти величину  $\nu$  (в области  $0 < \nu < 1$ ), которая является единственным корнем уравнения:

$$\nu = \alpha(\mu - \mu \cdot \nu). \quad (3.10)$$

После решения уравнения (3.10) величины  $IPTD$  и  $IPDV$  определяются по таким формулам:

$$IPTD = \frac{1}{\mu - \nu\mu}, \quad IPDV = \frac{-\ln(1-p)}{\mu - \nu\mu}. \quad (3.11)$$

Для модели вида  $M / M / 1 / \infty / f_0$  решение уравнения (3.10) дает такой результат:  $\nu = \rho$ . Это означает, что выражения (3.3) и (3.11) совпадают. Формальное сходство соотношений (3.3) и (3.11) подтверждает возможность использования формулы (3.6) для упрощения исследований процессов по обслуживанию трафика.

Для исследуемой модели при нескольких разных видах распределения  $A(t)$  была проверена и подтверждена корректность применения формулы (3.6). Выявленная закономерность указывает на то, что определяющим фактором для предлагаемого способа пересчета квантиля является закон распределения времени обслуживания IP-пакетов  $B(t)$ . Он должен быть экспоненциальным.

Величины  $IPDV$  и  $IPTD$  резко возрастают при повышении загрузки  $\rho$ . Это общее свойство систем телетрафика с ожиданием вне зависимости от вида функций  $A(t)$  и  $B(t)$ . С практической точки зрения для исследуемой модели вида  $GI / M / 1 / \infty / f_0$  интересна зависимость показателей  $IPDV$  и  $IPTD$  от загрузки  $\rho$  и коэффициента вариации  $C_A$ , определяемого видом функции  $A(t)$ .

В качестве исследуемой функции  $A(t)$  было выбрано гиперэкспоненциальное распределение [19], которое позволяет исследовать поведение системы телеграфика в широком диапазоне изменения величины  $C_A$ . На рисунках 3.2 и 3.3



приведены кривые, иллюстрирующие характер изменения величин  $IPDV$  и  $IPTD$  соответственно. Все виды имитационного моделирования в диссертационной работе выполнялись с уровнем доверия 0,95. При этом доверительные интервалы не превысили 1% от исследуемой величины – фрагмент с "увеличительным стеклом" для верхней кривой. На других графиках доверительные интервалы не показаны вследствие их близости к исследуемым функциям.

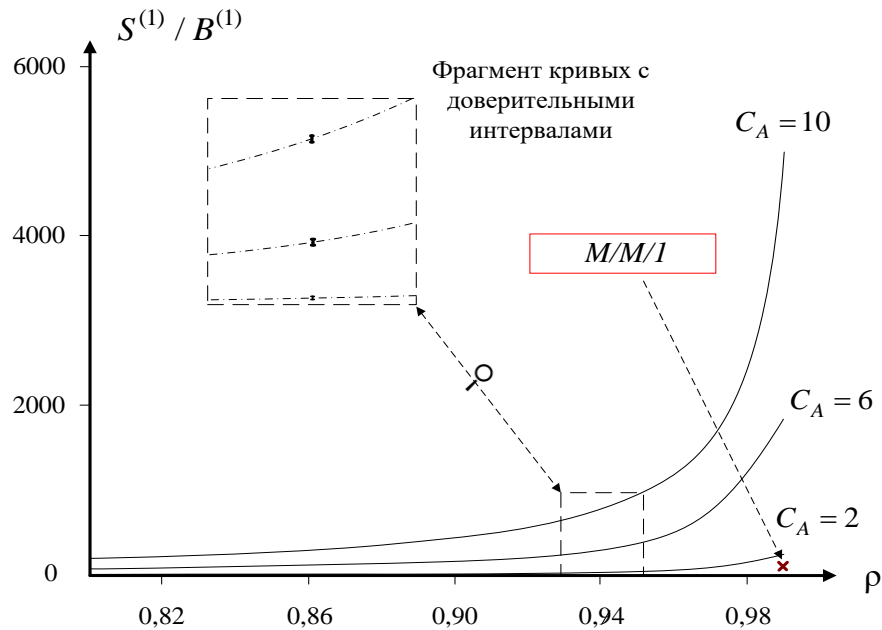


Рисунок 3.2 – Зависимость величины  $IPTD$  от загрузки и параметра  $C_A$

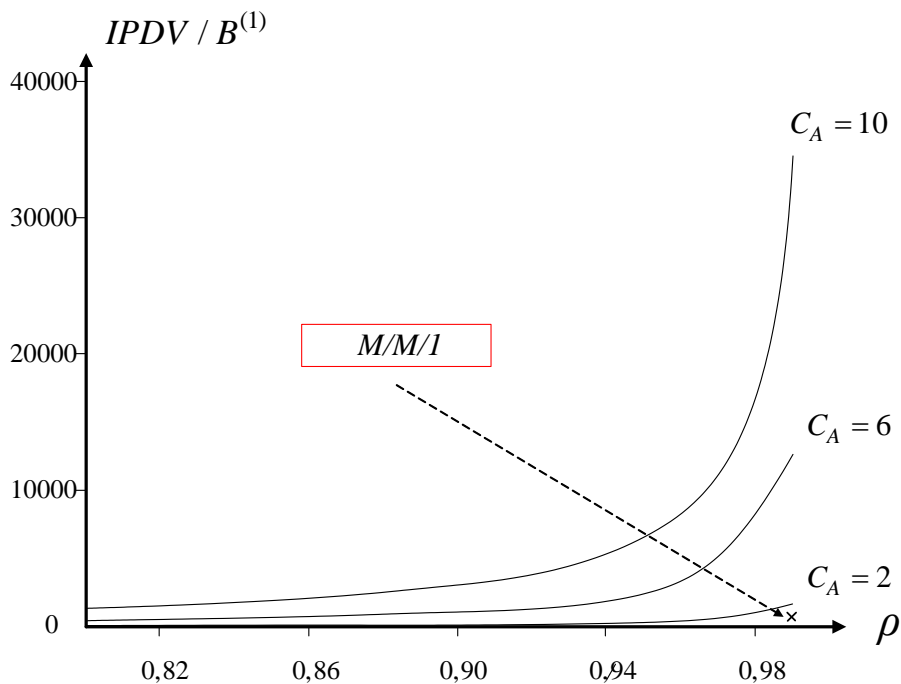


Рисунок 3.3 – Зависимость величины  $IPDV$  от загрузки и параметра  $C_A$

Графики построены для трех значений  $C_A$ : 2, 6 и 10 в диапазоне  $0,8 \leq \rho < 1$ . На тех же графиках для точки  $\rho = 0,99$  показаны значения  $IPDV$  и  $IPTD$  для модели  $M / M / 1 / \infty / f_0$ . По оси ординат обозначены значения обеих исследуемых величин, нормированных к среднему времени обработки IP-пакетов  $B^{(1)}$ .

Поведение функций  $IPTD = f(\rho, C_A)$  и  $IPDV = f(\rho, C_A)$  позволяет сделать ряд интересных и очень важных для практики выводов. Во-первых, характер обеих кривых  $IPTD = f(\rho, C_A)$  и  $IPDV = f(\rho, C_A)$  идентичен, что было ожидаемо с учетом выражения (3.7). Во-вторых, величины  $IPTD$  и  $IPDV$  при росте трафика заметно превышают (на порядки, а не в разы) среднее время задержки IP-пакетов. В-третьих, на исследуемые величины заметно влияет величина коэффициента вариации  $C_A$ , то есть выражение "поведение системы телетрафика при большой нагрузке" лишь частично характеризует возникающую ситуацию. Необходимо указывать и для какого вида входящего потока исследуется поведение системы при большой нагрузке. Если удастся управлять процессом  $A(t)$  так, чтобы снижался коэффициент вариации  $C_A$ , то появится реальная возможность достаточно эффективной поддержки максимально достижимого уровня качества обслуживания трафика.

### 3.4 Исследование основных моделей узла коммутации NGN

#### 3.4.1 Конкретизация моделей УК

Моделям вида  $M / M / 1 / \infty / f_0$  и  $GI / M / 1 / \infty / f_0$  присущи, по крайней мере, три особенности, требующие перехода к анализу более сложных СМО. Во-первых, ФР времени обслуживания заявок  $B(t)$  плохо представима экспоненциальным законом. Во-вторых, размер очереди в любом маршрутизаторе всегда ко-

нечен. В-третьих, на практике обработка IP-пакетов обычно осуществляется с учетом их приоритетов [199].

Эти обстоятельства определяют необходимость применения моделей основных компонентов NGN, адекватно отражающих протекающие в них процессы. Схожесть этих процессов, с точки зрения теории телетрафика, позволяет использовать одни и те же модели для маршрутизаторов, шлюзов и других типов активного оборудования. По этой причине достаточно рассматривать УК как типичное активное оборудование NGN. Длительность обмена IP-пакетами между смежными элементами NGN удобно рассматривать как задержки (постоянные либо переменные), которые не меняются при разных значениях нагрузки активного оборудования.

Характер входящего потока IP-пакетов меняется при существенном возрастании трафика [132]. Вероятность появления длительных пауз между моментами поступления IP-пакетов становится крайне низкой. С этой точки зрения практический интерес представляют распределения на ограниченном интервале времени  $[a, b]$ . Далее такие распределения обозначаются как  $A_l(t)$ . Нижний индекс  $l$  – первая буква в слове "limited" (ограниченный). Нижний индекс  $u$  (от слова "unlimited" – без ограничения) будет использован для распределений  $A_u(t)$ , определяемых на интервале  $[a, \infty)$ . Важным фактором при выборе типа распределения  $A_l(t)$  для модели УК становится возможность существенного варьирования величин коэффициента вариации длительности интервалов между моментами поступления заявок  $C_A$ . Назначение модели заключается в выявлении основных закономерностей. Они не меняют свою природу для распределений класса  $A_u(t)$  при условии, что  $a = 0$ , а  $b = 1$ .

В [105, 106] показано, что модель телетрафика с входящим потоком заявок, заданным распределением  $A_l(t)$ , позволяет получить верхние границы для характеристик  $IPTD$  и  $IPDV$  по сравнению с результатами для моделей, которые основаны на использовании распределений вида  $A_u(t)$ , при одинаковых значениях

величины  $C_A$ . Данное утверждение имеет очевидный физический смысл: для распределения  $A_i(t)$  длительность периода свободности [70] не может превышать величину  $b$ , а для распределений  $A_u(t)$  ограничение такого рода, по определению, отсутствует.

Для получения результатов целесообразно выделить несколько типовых моделей узла NGN. Каждая из них – частный случай модели вида  $G/G/1/r/f_j$ , для которой конкретизируются основные характеристики трафика и дисциплины обслуживания заявок.

Первая типовая модель – система телетрафика вида  $Beta/U/1/\infty/f_0$ . Здесь функция  $A(t)$  – определяется бета-распределением. Длительность обработки заявок предполагается случайной величиной, распределенной равномерно (на этот факт указывает символ  $U$  – uniform) на интервале  $[x - \Delta x, x + \Delta x]$ . Вторая типовая модель – система телетрафика вида  $Weibull/U/1/\infty/f_0$ . Обозначение *Weibull* введено для идентификации другого вида функции  $A(t)$  – распределения Вейбулла. Это распределение относится к классу  $A_u(t)$ .

Третья и четвертая типовые модели представляют собой системы телетрафика  $Beta/D/1/\infty/f_0$  и  $Weibull/D/1/\infty/f_0$  соответственно. Они отличаются от первой и второй типовых моделей тем, что длительность обслуживания заявок считается постоянной величиной.

Для этих четырех моделей  $IPLR \equiv 0$ . Для следующих четырех типовых моделей вводится ограничение количества мест для ожидания величиной  $r$ . Они обозначены так:  $Beta/U/1/r/f_0$ ,  $Weibull/U/1/r/f_0$ ,  $Beta/D/1/r/f_0$  и  $Weibull/D/1/r/f_0$  соответственно.

В качестве следующих восьми моделей выбраны системы телетрафика, в которых используется приоритетная дисциплина выбора заявок на обслуживание из общей очереди. При этом количество мест для ожидания в очереди предполагается бесконечным или ограниченным величиной  $r$ . Эти модели можно представить так: *Beta или Weibull / U или D / 1 /  $\infty$  или r /  $f_1$* .

Семнадцатая типовая модель соответствует обозначению такого вида:  $GI / G / 1 / r / f_j$ . Назначение этой модели – проверка результатов, полученных при изменении законов одного или сразу двух распределений –  $A(t)$  и  $B(t)$ . В качестве функций  $A(t)$  чаще используются распределения класса  $A_u(t)$ . Эту модель можно рассматривать как набор инструментов, назначение которых оценка устойчивости выводов, получаемых при использовании восьми предыдущих моделей.

Маршрут обмена IP-пакетами можно рассматривать как многофазную СМО. В этой модели каждый компонент будет представлять собой СМО вида  $GI / G / 1 / r / f_j$ . Причем входящий поток заявок будет суперпозицией нескольких выходящих потоков из предшествующих фаз [212, 213].

Предложенные модели не могут быть исследованы точными аналитическими методами. По этой причине основным инструментом анализа СМО и, тем более, многофазных СМО становится имитационное моделирование систем теле-трафика [67].

### 3.4.2 Выбор параметров моделей УК

Для исследуемых моделей УК необходимо определить параметры функций  $A(t)$  и  $B(t)$ . Эту процедуру следует осуществить для выбранных в предыдущем разделе законов распределения рассматриваемых случайных величин.

Плотность вероятности бета-распределения  $f(t)$ , которая задана для интервала  $0 < t < 1$ , имеет параметры формы  $u$  и  $v$ , определяется такой формулой [19]:

$$f(t) = \frac{\Gamma(u+v)}{\Gamma(u)\Gamma(v)} t^{u-1} (1-t)^{v-1}. \quad (3.12)$$

Для переменных, входящих в формулу (3.12), справедливы следующие условия:  $u > 0, v > 0$ . Соотношения для расчета математического ожидания длительности интервалов между моментами поступления заявок  $A^{(1)}$ , дисперсии этой

же случайной величины  $\sigma_A^2$  и коэффициента вариации  $C_A$  приведены, например, в [19]:

$$A^{(1)} = \frac{u}{u+v}, \quad \sigma_A^2 = \frac{uv}{(u+v)^2(u+v+1)}, \quad C_A = \sqrt{\frac{v}{u(u+v+1)}}. \quad (3.13)$$

Для выбранного вида функции  $B(t)$  аналогичные характеристики обслуживания заявок –  $B^{(1)}$ ,  $\sigma_B^2$  и  $C_B$  определяются следующими соотношениями [19]:

$$B^{(1)} = x, \quad \sigma_B^2 = \frac{(\Delta x)^2}{3}, \quad C_A = \frac{\Delta x}{x\sqrt{3}}. \quad (3.14)$$

При переходе от моментов  $A^{(1)}$  и  $B^{(1)}$  формула для оценки загрузки записывается в такой редакции:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{x(u+v)}{u}. \quad (3.15)$$

Очевидно, что  $A^{(1)} < 1$ . Можно зафиксировать величину  $A^{(1)}$  и менять параметры распределения  $A(t)$  так, чтобы получать необходимые значения для коэффициента вариации  $C_A$ . Тогда для получения параметров  $u$  и  $v$  необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} A^{(1)} = \frac{u}{u+v} \\ C_A = \sqrt{\frac{v}{u(u+v+1)}} \end{cases}. \quad (3.16)$$

После несложных преобразований получаем:

$$v = \frac{[1 - A^{(1)}][1 - A^{(1)}(1 + C_A^2)]}{A^{(1)}C_A^2}, \quad u = \frac{1 - A^{(1)}[1 + C_A^2]}{C_A^2}. \quad (3.17)$$

Величину  $x$  следует подбирать так, чтобы в результате получалось то значение загрузки  $\rho$ , которое необходимо исследовать. Таким образом, для проведения моделирования следует задать диапазон изменения загрузки  $\rho$  коэффициентов вариации  $C_A$  и  $C_B$ , а также числа мест для ожидания  $r$ .

При использовании распределений класса  $A_u(t)$  необходимо, чтобы величины  $A^{(1)}$  и  $C_A$  оставались такими же, какие ранее были выбраны для распределений класса  $A_l(t)$ . В частности, из возможных распределений класса  $A_u(t)$  подходит распределение Вейбулла с параметром масштаба  $a$  и параметром формы  $c$ :

$$A_u(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^c\right]. \quad (3.18)$$

Для данного распределения величины  $A^{(1)}$  и  $C_A$  рассчитываются по таким формулам:

$$A^{(1)} = a\Gamma\left(\frac{1}{c} + 1\right), \quad C_A = \sqrt{\frac{\Gamma\left(\frac{2}{c} + 1\right)}{\Gamma^2\left(\frac{1}{c} + 1\right)}} - 1. \quad (3.19)$$

Используя изложенный выше прием, получаем соотношения, из которых можно найти параметры масштаба  $a$  и формы  $c$  через величины  $u$  и  $v$ :

$$\frac{u}{u+v} = a\Gamma\left(\frac{1}{c} + 1\right), \quad \frac{v}{u(u+v+1)} = \frac{\Gamma\left(\frac{2}{c} + 1\right)}{\Gamma^2\left(\frac{1}{c} + 1\right)} - 1. \quad (3.20)$$

Параметры  $a$  и  $c$  из соотношений (3.20) приходится определять численно. Решить систему уравнений в явном виде невозможно из-за того, что в обе формулы входит гамма-функция.

В качестве альтернативного распределения  $B(t)$  был выбран случай, когда  $\Delta x = 0$ . Иными словами, длительность обработки IP-пакетов полагается постоянной величиной.

Для всех видов исследуемых СМО после проведения моделирования можно сформулировать ряд общих результатов. Они сводятся к следующим положениям.

Во-первых, практический интерес связан с исследованием периода  $T$ , за который суммарное количество поступивших IP-пакетов  $N_A(T)$  больше, чем число обслуженных IP-пакетов  $N_B(T)$ . Величина  $N_A(T)$  может быть определена в про-

цессе измерения входящего потока IP-пакетов с высокой точностью, свойственной используемым для этой цели аппаратно-программным средствам. Значение  $N_B(T)$  проще всего вычислить, если время обработки IP-пакетов является постоянной величиной  $\tau$ . Данная гипотеза справедлива для маршрутизаторов, применяемых в сетях следующего поколения. Тогда  $N_B(T)$  равно частному от деления  $T$  на  $\tau$ . Ряд моделей, предложенных в [102], основан на гипотезе о равномерном законе распределения длительности обслуживания заявок. Ниже будет показано, что несложно получить верхнюю и нижнюю оценки для исследуемых характеристик модели, варьируя значение  $\tau$ , но сохраняя предположение о постоянстве длительности обслуживания заявок.

Во-вторых, использование приоритетных дисциплин обслуживания и/или отказ от поддержки некоторых видов услуг позволяют эффективно обрабатывать те виды трафика, которые напрямую связаны с ликвидацией последствий ЧС, а также рассматриваются как важные для органов государственной власти и населения. Примерами трафика, который не относится к существенному в период ликвидации последствий ЧС, можно считать нагрузку, порождаемую развлекательными услугами. Для трафика, обслуживание которого будет продолжено в период ликвидации последствий ЧС, должно соблюдаться хорошо известное в теории телетрафика ограничение на загрузку  $\rho_{\text{ЧС}}$  следующего вида:  $\rho_{\text{ЧС}} < 1$ .

В-третьих, при исследовании характеристик узла коммутации для значений, примерно,  $\rho_{\text{ЧС}} \geq 0,7$  использование имитационных моделей с бесконечным количеством мест для ожидания  $r$  не продуктивно [131, 187]. По этой причине среди моделей, предложенных в предыдущем разделе диссертации, следует выбрать подмножество, для которого характерно условие  $r < \infty$ .

В-четвертых, сокращение номенклатуры используемых имитационных моделей может быть выполнено за счет использования гипотезы о том, что время обслуживания заявок (то есть, обработки IP-пакетов) – постоянная величина  $\tau$ . Выше было сказано, что изменение значения  $\tau$  позволяет не столь сложно получить верхнюю и нижнюю оценки исследуемых параметров модели, для которой



длительность обслуживания распределена равномерно на интервале  $[x - \Delta x, x + \Delta x]$ . Величина  $\eta$ , используемая далее, определяется отношением  $\Delta x$  к  $x$ . Она характеризует максимальное отклонение исследуемой случайной величины от своего среднего значения. Для распределения  $B(t)$ , выраженного в предложенной форме, среднее значение  $B^{(1)}$  и коэффициент вариации  $C_B$  вычисляются по таким формулам:

$$B^{(1)} = x, \quad C_B = \frac{\eta}{\sqrt{3}}. \quad (3.21)$$

Если входящий поток заявок считать пуассоновским, то степень варьирования величины  $\tau$  можно определить из равенства средних значений для времени ожидания начала обслуживания. Эти значения определяются по формуле Поллячека-Хинчина [70]. Подставляя все необходимые параметры для моделей с рассматриваемыми законами распределения  $B(t)$ , получаем:

$$x \frac{\rho \left( 1 + \frac{\eta^2}{3} \right)}{2(1-\rho)} = \tau \frac{\rho}{2(1-\rho)}. \quad (3.22)$$

Из этого равенства величина  $\tau$  определяется очевидным образом:

$$\tau = x \left( 1 + \frac{\eta^2}{3} \right). \quad (3.23)$$

При небольших изменениях переменной  $\eta$  (обычно – до 10%) можно использовать очень простую процедуру. Она подразумевает поочередное присвоение величине  $\tau$  двух крайних значений:  $x - \Delta x$  и  $x + \Delta x$ . Результаты моделирования для СМО с входящими потоками заявок, отличающимися от пуассоновского, подтвердили эффективность использования такого подхода для получения верхней и нижней границы исследуемых характеристик СМО.

В-пятых, при условии  $N_A(T) > N_B(T)$  исследование моделей без приоритетной дисциплины обслуживания не имеет практического смысла. Правда, режим работы СМО при  $\rho \rightarrow 1$  остается важной задачей, но не столь интересной для

имитационной модели, так как неплохие результаты показало использование известных приближений при большой нагрузке [69, 70, 209, 217].

Таким образом, выделяются две базовые СМО, на которые целесообразно обратить основное внимание при анализе результатов имитационного моделирования. Данные модели в классификации Кендалла обозначаются  $Weibull / D / 1 / r / f_1$  и  $Beta / D / 1 / r / f_1$ . На вход первой СМО поступает поток вида  $A_u(t)$ , а второй модели –  $A_l(t)$ .

В качестве примера входящего потока заявок класса  $A_u(t)$  использовано распределение Вейбулла. Для СМО с входящими потоками заявок класса  $A_u(t)$  допускаются длительные периоды свободности [70]. Тем не менее, при высоком коэффициенте вариации  $C_A$  и/или росте нагрузки этот фактор не приводит к снижению очереди на обслуживание.

Без учета заявок второго (нижнего) приоритета при загрузке  $\rho = 0,3$  для исследуемой СМО имитационное моделирование позволило получить такие оценки для  $C_A = 10$ :

- математическое ожидание времени задержки, нормированное к длительности обслуживания,  $S^{(1)} / B^{(1)} \approx 13,71$ ;
- коэффициент вариации этой же случайной величины  $C_S \approx 0,96$ .

Для СМО вида  $M / D / 1 / \infty / f_0$  эти же параметры образуют такую пару:  $S^{(1)} / B^{(1)} \approx 1,21$  и  $C_S \approx 0,36$ . Если нагрузка возрастает до  $\rho = 0,7$ , то для имитационной модели исследуемые параметры определяются такими величинами:  $S^{(1)} / B^{(1)} \approx 79,02$  и  $C_S \approx 1,01$ . Для СМО  $M / D / 1 / \infty / f_0$  расчет этих же параметров дает следующие значения:  $S^{(1)} / B^{(1)} \approx 2,17$  и  $C_S \approx 0,67$ . Данные примеры показывают, что использование гипотезы о пуассоновском входящем потоке приводит к очень большим ошибкам. Причем эта ошибка растет с увеличением загрузки  $\rho$ .

### 3.4.3 Результаты исследования моделей УК

На рисунке 3.4 показаны кривые, иллюстрирующие изменение среднего значения нормированного времени задержки заявок первого относительного приоритета  $S_1^{(1)} / B_1^{(1)}$  в зависимости от соответствующей загрузки  $\rho_1$ . Показан ряд кривых для трех значений коэффициента вариации  $C_A$ . Здесь и далее предполагается, что заявки первого приоритета связаны с трафиком, который существенен при ликвидации последствий ЧС. Принципы выбора соответствующих видов трафика рассматриваются ниже.

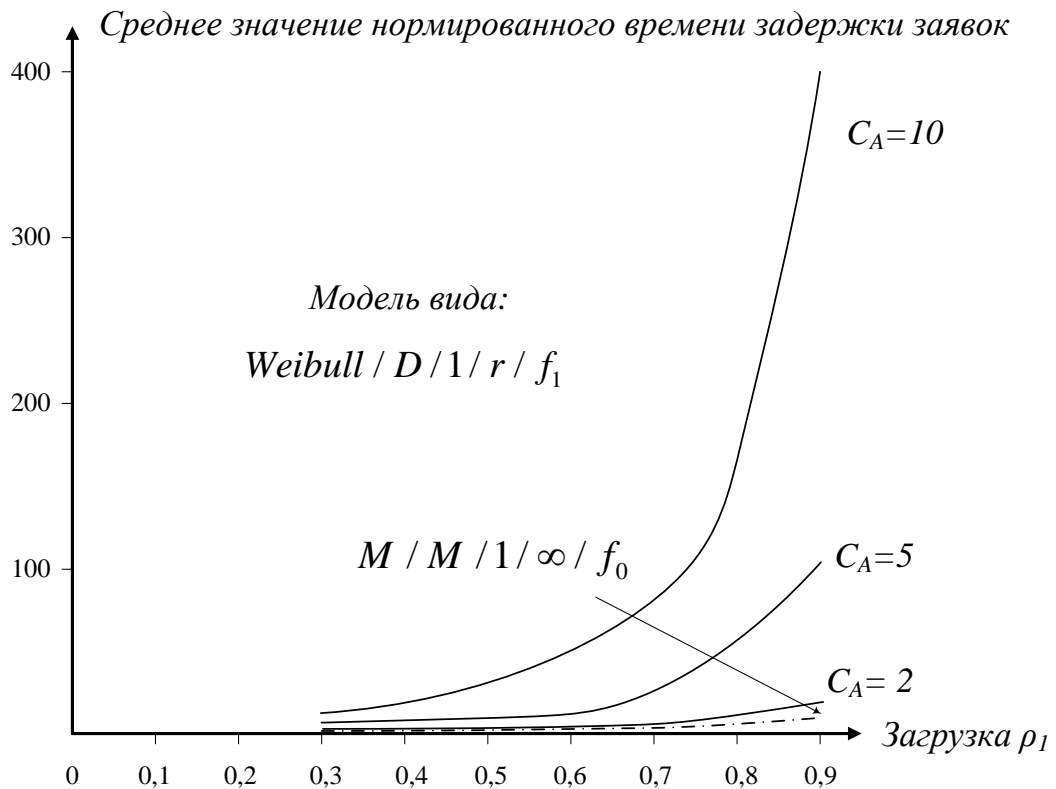


Рисунок 3.4 – Среднее значение задержки приоритетных заявок. Поток  $A_u(t)$

При моделировании предполагалось, что интенсивность потока заявок второго приоритета в четыре раза выше, чем аналогичная величина для потока заявок первого (высшего) приоритета. Анализ результатов моделирования показал, что влияние этого соотношения не является существенным, если длительность обслуживания заявок низшего приоритета  $B_2^{(1)}$  ограничена разумными пределами.

По крайней мере, эта величина не должна превосходить на порядок аналогичное значение для заявок первого приоритета  $B_1^{(1)}$ .

В тех случаях, когда сложно установить характер функций  $A(t)$  и  $B(t)$ , некоторые исследователи выбирают простейшую модель –  $M / M / 1 / \infty / f_0$ , позволяющую аналитически определить почти все вероятностно-временные характеристики исследуемой СМО. Значение параметра  $S_1^{(1)}$  для такой модели показано на рисунке 3.4 штрихпунктирной линией. Очевидно, что такое упрощение модели не позволяет получить оценки, близкие к реальной ситуации, для больших значений коэффициента вариации  $C_A$ .

Отсутствие заметного влияния объема трафика, который создается заявками второго приоритета, позволяет упростить анализ характеристик СМО, в которых используются приоритетные дисциплины обслуживания [45]. Можно, в частности, использовать подход, предложенный в [186]. Приведенные на рисунке 3.4 значения  $S_1^{(1)}$  для практически значимого диапазона загрузки весьма существенны. По этой причине поправочный коэффициент, введенный в [186], может быть опущен. Тогда оценку  $S_1^{(1)}$  можно получить в такой форме:

$$S^{(1)} < S_1^{(1)} < S^{(1)} + B_2^{(1)}. \quad (3.24)$$

Обычно предполагается, что  $B_1^{(1)} = B_2^{(1)}$ . Это обусловлено идентичностью операций по обработке IP-пакетов всех видов в УК, используемых в NGN. Зависимость коэффициента вариации от загрузки не приводится, так как функция  $C_A = f(\rho)$  близка к единице. Об этом свидетельствуют два численных примера, приведенных выше.

Приоритетную дисциплину обслуживания заявок можно моделировать при помощи СМО с бункером на входе, предложенной в [9]. Допустим, что в СМО нет заявок, которым назначен первый приоритет. В этом случае из бункера, емкость которого полагается бесконечной, извлекается заявка. Ее обслуживание не прерывается при поступлении заявки первого приоритета. Такой подход позволяет рассматривать вполне возможную ситуацию, когда загрузка  $\rho_2$ , создаваемая

заявками второго приоритета, намного больше исследуемого трафика, то есть:  $\rho_2 \gg \rho_1$ .

Применение модели с бункером на входе не позволяет исследовать вероятностно-временные характеристики для заявок второго (низшего) приоритета. Для задач, поставленных в диссертации, данное обстоятельство не представляется существенным. Важным положительным свойством модели с бункером на входе служит тот факт, что для нее в [9] и в ряде других работ доказана справедливость некоторых базовых соотношений теории телетрафика, которые были получены при условии  $\rho < 1$ .

До дальнейшего анализа исследуемой модели следует изложить аналогичные результаты, полученные для СМО с потоком заявок вида  $A_l(t)$ . Предлагаемый подход обусловлен тем, что для обеих моделей можно найти схожие закономерности. Данное утверждение связано с результатами исследования однолинейных СМО с произвольными законами распределения  $A(t)$  и  $B(t)$ . Эти результаты приведены, например, в монографии [69].

Из функций  $A_l(t)$  для имитационной модели был выбран поток заявок, описываемый бета-распределением [19]. Оно задано на ограниченном интервале  $[a, b]$ . Это значит, что длительность интервала между соседними заявками никогда не превышает порог  $b$ . С учетом особенностей трафика в пакетных сетях необходимо исследовать большие значения коэффициента вариации  $C_A$ . Тогда различия параметров времени задержки по сравнению с привычными простыми моделями вида  $M/M/1/\infty/f_0$  или  $M/D/1/\infty/f_0$  становятся весьма ощутимыми.

На рисунке 3.5 показаны кривые, которые характеризуют нормированное среднее значение времени задержки заявок первого приоритета  $S_1^{(1)} / B_1^{(1)}$  как функцию соответствующей загрузки  $\rho_1$ . Графики построены для тех же трех значений коэффициента вариации  $C_A$ , которые были выбраны при исследовании

предыдущей модели. Штрихпунктирной линией показана исследуемая зависимость для модели  $M / M / 1 / \infty / f_0$ .

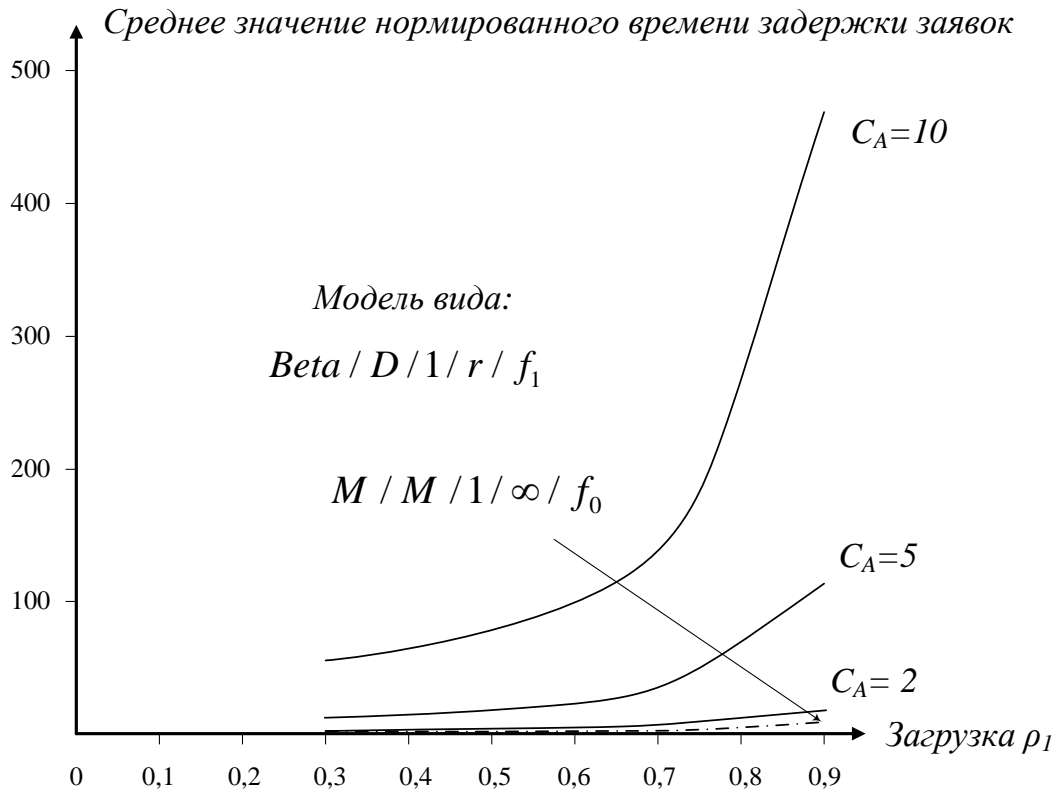


Рисунок 3.5 – Среднее значение задержки приоритетных заявок. Поток  $A_i(t)$

Характер кривых совпадает с поведением аналогичных функций, представленных на рисунке 3.4. Более того, похожи и численные значения исследуемых зависимостей. Тем не менее, существуют различия значений  $S_1^{(1)} / B_1^{(1)}$  для обеих моделей, что иногда требует уточнения приближенных соотношений, приведенных в [3, 70, 217].

В частности, для оценки величины  $S_1^{(1)} / B_1^{(1)}$  при постоянном времени обслуживания заявок и  $C_A > 1$ , используя приведенные в [3, 70, 217] выражения, актуальны две следующие формулы:

$$\frac{S_1^{(1)}}{B_1^{(1)}} \approx 1 + \frac{(C_A^2 + C_B^2)}{2\rho_1(1 - \rho_1)}. \quad (3.25)$$

$$\frac{S_1^{(1)}}{B_1^{(1)}} \approx 1 + \frac{\rho_1(C_A^2 + C_B^2)}{2(1 - \rho_1)} \exp \left[ -(1 - \rho_1) \frac{C_A^2 - 1}{C_A^2 + 4C_B^2} \right]. \quad (3.26)$$

Характер кривых совпадает с поведением аналогичных функций, представленных на рисунке 3.4. Более того, похожи и численные значения исследуемых зависимостей. Тем не менее, существуют различия значений  $S_1^{(1)} / B_1^{(1)}$  для обеих моделей, что иногда требует уточнения приближенных соотношений, приведенных в [69, 217]. В частности, для оценки величины  $S_1^{(1)} / B_1^{(1)}$  при постоянном времени обслуживания заявок и  $C_A > 1$ , используя приведенные в [69, 210] выражения, несложно вывести две следующие формулы:

$$\frac{S_1^{(1)}}{B_1^{(1)}} \approx 1 + \frac{C_A^2}{2\rho_1(1-\rho_1)}, \quad (3.27)$$

$$\frac{S_1^{(1)}}{B_1^{(1)}} \approx 1 + \frac{\rho_1 C_A^2}{2(1-\rho_1)} \exp\left[-(1-\rho_1) \frac{C_A^2 - 1}{C_A^2}\right]. \quad (3.28)$$

Обе формулы свидетельствуют, что при идентичных значениях  $\rho_1$  и  $C_A$  искомая оценка инвариантна к виду функции  $A_1(t)$ . Результаты моделирования этого не подтвердили, что, строго говоря, не противоречит оценкам (3.27) и (3.28), которые, как отмечено в [69, 217], были получены для большой загрузки, то есть при  $\rho_1 \rightarrow 1$ . Значит, для диапазона  $0,7 < \rho_1 < 1$ , который наиболее интересен с практической точки зрения, необходимо уточнить приближения вида (3.27) и (3.28). Эта задача рассматривается в конце данного параграфа.

Анализ относительных ошибок при расчете нормированных значений для среднего времени задержки заявок  $\delta(\rho_1)$  позволил сформулировать ряд весьма важных выводов. Их можно свести к трем ключевым положениям.

Во-первых, для исследованных распределений вида  $A_u(t)$  в диапазоне  $0,7 < \rho_1 < 1$  для минимизации величины  $\delta(\rho_1)$  следует использовать формулу (3.27). При условии, что  $C_A \leq 10$  исследуемая ошибка составляет величину порядка 20%, монотонно убывая с ростом  $\rho_1$ .

Во-вторых, для исследованных распределений вида  $A_l(t)$  в диапазоне  $0,7 < \rho_1 < 1$  целесообразно выполнять расчеты по формуле (3.28). Она позволяет

минимизировать величину  $\delta(\rho_1)$ . Зависимость  $\delta(\rho_1)$  также монотонно убывает с ростом  $\rho_1$  и для  $C_A \leq 10$  не превышает 20%.

В-третьих, для обоих видов исследованных распределений  $A_i(t)$  и  $A_u(t)$  при соблюдении условия  $0,7 < \rho_1 < 1$  коэффициент вариации времени задержки заявок  $C_s$  очень близок к единице. Таким свойством обладает экспоненциальное распределение. Косвенным подтверждением этой гипотезы можно считать результаты исследования поведения СМО вида  $G/G/1/\infty/f_0$  при большой загрузке [69]. При  $\rho \rightarrow 1$  распределение времени ожидания  $W_1(t)$  в СМО, которая обслуживает поток заявок с интенсивностью  $\lambda_1$ , с учетом постоянства длительности обслуживания (дисперсия этой случайной величины равна нулю) оценивается по такой формуле [69]:

$$W_1(t) \approx 1 - \exp\left[-\frac{2(1-\rho_1)\lambda_1 t}{C_A^2}\right] \rightarrow t_p \approx B^{(1)} + \left|\frac{\ln(1-p)C_A^2}{2\lambda_1(1-\rho_1)}\right|. \quad (3.29)$$

Это означает, что распределение времени задержки также будет экспоненциальным со сдвигом по оси абсцисс на длительность обслуживания заявок. Функция  $S_1(t)$  при постоянном времени обслуживания для всех значений  $t \geq B_1^{(1)}$  определяется как  $W(t - B_1^{(1)})$ . Если  $t < B_1^{(1)}$ , то  $S_1(t) = 0$ .

Вернемся к вопросу уточнения приближения вида (3.27) и (3.28). Заметим, что использование модели с бункером на входе позволяет отказаться от нижнего индекса "1", который был введен для указания на метрики, касающиеся заявок первого относительного приоритета.

Исследуемую модель, представляющую собой СМО с бункером на входе, согласно принятым в [9] обозначениям, можно записать в классификации Кендалла в такой форме:  $G,B/G,D/1/\infty/f_1$ . Обозначение "B" указывает на наличие бункера на входе модели. Когда в очереди на обработку отсутствуют заявки первого приоритета, из бункера сразу же поступают заявки низшего приоритета.

Оценки, полученные по приближенным формулам, сравнивались с результатами моделирования при полезной загрузке  $\rho$  (трафик, который важен в период



ликвидации последствий ЧС). При  $\rho > 0,9$  известные приближения позволяют получить искомые оценки с относительной ошибкой не более 20%. При  $\rho < 0,7$  анализ выбранной модели не представляет практического интереса, так как – согласно проведенным МСЭ-Т исследованиям [232] – обеспечивается выполнение всех установленных показателей качества предоставления услуг. Следовательно, необходимо минимизировать возникающие ошибки в оценке исследуемых параметров качества обслуживания для трафика в диапазоне  $0,7 < \rho < 0,9$ . В качестве исследуемых параметров используются нормы, установленные МСЭ-Т в рекомендации Y.1541. Для получения соответствующих оценок необходимо вычислить математическое ожидание времени задержки IP-пакетов  $S^{(1)}$  и  $p$ -квантиль функции распределения этой же случайной величины  $t_p$  [187, 236]. Величина  $S^{(1)}$  используется для вычисления нормированного показателя *IPTD* – среднего значения времени задержки IP-пакетов между интерфейсами пользователь-сеть. Квантиль необходим для последующего расчета вариации времени задержки *IPDV*.

Анализ результатов моделирования показал, что лучшим приближением для выбранного диапазона изменений загрузки  $\rho$  следует считать формулу, которую предложили Крамер и Лангенбах-Бельц [10, 210]. Для исследуемой модели эта формула, приведенная выше как соотношение (3.28), представима в такой редакции:

$$\frac{S^{(1)}}{B^{(1)}} \approx 1 + \frac{\rho C_A^2}{2(1-\rho)} \exp \left[ -(1-\rho) \frac{C_A^2 - 1}{C_A^2} \right]. \quad (3.30)$$

Выражение (3.30) позволяет оценить среднее значение времени задержки IP-пакетов с относительной ошибкой порядка 20% для распределений класса  $A_\gamma(t)$ . Если входящий поток IP-пакетов представим распределением  $A_u(t)$ , то данное выражение позволяет получить оценки  $S^{(1)}$  с приемлемой относительной ошибкой для загрузки, близкой к предельной для выбранного диапазона изменений  $\rho$ . Для значений  $\rho$ , близких к начальной области исследуемого диапазона (в частности, при  $0,7 \leq \rho < 0,8$ ) предлагаемое выражение следует уточнить:

$$\frac{S^{(1)}}{B^{(1)}} \approx 1 + \frac{C_A^2}{2(1-\rho)} \exp\left[-(1-\rho) \frac{C_A^2 - 1}{C_A^2}\right]. \quad (3.31)$$

Выражение (3.31) обеспечивает оценку среднего значения для времени задержки IP-пакетов с относительной ошибкой порядка 20%, если распределение интервалов между моментами поступления IP-пакетов относится к функциям класса  $A_u(t)$ .

Если в формулах (3.30) и (3.31) разложить выражение в квадратных скобках в ряд Маклорена, то можно получить не менее точные, но более компактные приближения:

$$\begin{aligned} S_1^{(1)} &\approx B_1^{(1)} \left[ 1 + \frac{\rho^2 C_A^2}{2(1-\rho)} \right], & \text{для } A_u(t), \text{ при } \rho \geq 0,7; \\ S_1^{(1)} &\approx B_1^{(1)} \left[ 1 + \frac{\rho C_A^2}{2(1-\rho)} \right], & \text{для } A_l(t), \text{ при } \rho \geq 0,7. \end{aligned} \quad (3.32)$$

Выражения (3.32) обеспечивают оценку среднего значения для времени задержки IP-пакетов с относительной ошибкой порядка 20%. Такой же порядок относительной ошибки характерен также для оценки квантиля  $t_p$  по формуле (3.29) и вероятности потери IP-пакетов –  $\pi$ , которая рассматривается ниже.

На рисунке 3.6 приведены зависимости вероятности потери IP-пакетов от загрузки  $\rho$  для двух распределений вида  $A_u(t)$  и  $A_l(t)$ . Емкость буферного накопителя равна  $r$ . Коэффициент вариации  $C_A$  для обоих видов распределения выбран идентичным.

Очевидно, что максимальные потери IP-пакетов соответствуют распределению  $A_l(t)$ . По этой причине именно для этого типа распределений следует выбрать наилучшее приближение. Тогда данное приближение будет давать верхнюю оценку исследуемого показателя функционирования УК. Упрощение соотношения, приведенного в [182], позволило получить такую формулу для оценки вероятности потери IP-пакетов:

$$IPLR \approx (1-\rho) \rho^{\frac{2r}{C_A^2}}. \quad (3.33)$$

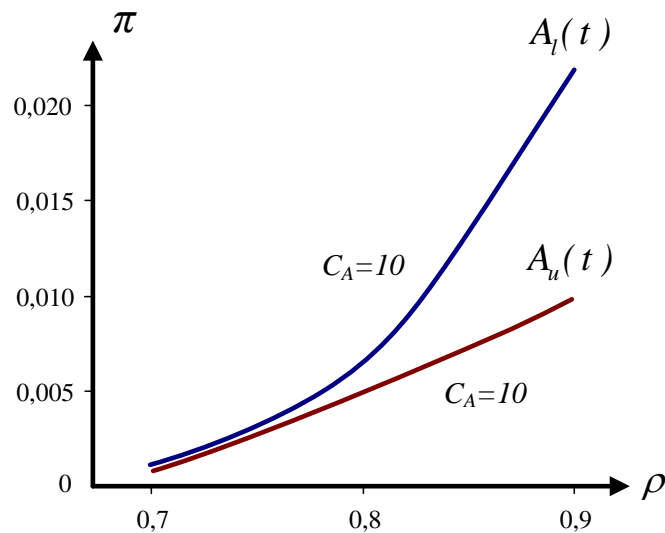


Рисунок 3.6 – Вероятность потери IP-пакетов как функция загрузки УК

Вычисления значения  $S^{(1)}$  на основании соотношений (3.30), (3.31) или (3.32), а также вероятности  $\pi$  по формуле (3.33) относятся к так называемым прямым задачам. При планировании сети электросвязи и управлении ее ресурсами чаще приходится решать обратные задачи. Типичный пример такой задачи может быть представлен расчетом значения загрузки  $\rho$ , для которого обеспечивается выполнение нормированной величины  $S^{(1)}$ . Полученное значение загрузки  $\rho$  определяется отношением двух величин интенсивности – входящего потока  $\lambda$  и обслуживания  $\mu$ . После возникновения ЧС могут уменьшиться ресурсы, определяющие интенсивность обслуживания  $\mu$ . Вследствие этого необходимо ограничить величину  $\lambda$ , что достигается, в основном, минимизацией некоторых видов трафика. Речь идет о трафике, для которого отказ в обслуживании не сказывается ни на эффективности ликвидации последствий ЧС, ни на поддержке важнейших социально-экономических процессов.

Моделирование показало, что экспоненциальный характер функции распределения  $W(t)$  сохраняется и для модели с бункером на входе. Данный факт для исследуемого диапазона изменений загрузки  $\rho$  был подтвержден за счет использования критерия согласия Пирсона [71]. Использование других критериев согла-

сия также позволяет сделать вывод о правомерности экспоненциального распределения длительности ожидания в очереди.

Статистические критерии не позволяют численно оценить ошибку, которая возникает при замене истинного распределения случайной величины каким-либо известным законом. Для экспоненциального распределения, как было показано в [101], можно пересчитать квантиль  $t_p$ . В рекомендации МСЭ-Т Y.1541 [236] квантиль нормируется в точке  $p = S(t) = 0,999$ . Для упрощения расчетов показателя  $IPDV$  целесообразно использовать квантиль  $t_{0,95}$ , определяемый в точке  $p = S(t) = 0,95$ . Соотношения, необходимые для вычисления квантиля  $t_{0,95}$ , приведены в [101].

Точность оценки показателя  $IPDV$  определяется погрешностью вычисления квантиля  $t_{0,95}$ . Для определения ошибки, обусловленной заменой функции распределения  $W(t)$  экспоненциальным законом, необходимы две следующие оценки:

- $z_1$  – квантиль  $t_{0,95}$ , получаемый методом имитационного моделирования;
- $z_2$  – квантиль  $t_{0,95}$ , вычисляемый на основании соотношений, которые содержатся в [101].

Тогда относительная ошибка в расчете исследуемого квантиля  $\delta_t$  вычисляется очевидным образом:

$$\delta_t = \frac{z_1 - z_2}{z_1}. \quad (3.34)$$

Результаты исследования относительной ошибки  $\delta_t$  для диапазона загрузки  $0,7 < \rho < 0,9$  показали, что она не превышает 10%. Это вполне приемлемо для оценки вероятностно-временных характеристик, которые определяют процессы обслуживания трафика в NGN в терминах показателей качества обслуживания.

### 3.5 Регулирование трафика в центре обслуживания вызовов Системы-112

Один из важнейших элементов телекоммуникационной системы – ЦОВ, который создается в составе Системы-112. Его роль усиливается в период действия ЧС. Этот ЦОВ можно рассматривать как один из видов УК. При анализе его вероятностно-временных характеристик процесс  $A(t)$  будет трактоваться как поток вызовов. Следовательно, в данном разделе под заявкой будет пониматься вызов, а не IP-пакет, как в предыдущих разделах третьей главы диссертационной работы.

В процессе проектирования ЦОВ рассчитывается оптимальное количество рабочих мест операторов для обработки поступающей нагрузки с заданными качественными показателями. При оценке параметров нагрузки учитываются имеющиеся статистические данные и результаты прогнозов. По очевидным причинам количество рабочих мест операторов не может рассчитываться на очень редкие, но весьма существенные всплески нагрузки. В результате возникает практически важная задача регулирования резко растущей нагрузки при минимальной потере информации, важной для эффективной ликвидации последствий ЧС.

Предположим, что резкий рост нагрузки наблюдается в период времени  $(T_1, T_2)$ . Пусть за этот период времени абонентами генерируется  $N_1 + N_2$  вызовов. Величина  $N_1$  определяет количество вызовов, обусловленных одной и той же ЧС. Припишем ей меру  $I_1 = k_1 \times N_1$ , где  $k_1$  – коэффициент пропорциональности. Под параметром  $I_1$  будем понимать объем полезной информации, касающейся рассматриваемой чрезвычайной ситуации. Величина  $N_2$  равна количеству вызовов, порождаемых иными причинами. Для нее, введя коэффициент пропорциональности  $k_2$ , можно определить аналогичную меру  $I_2$ . Интуитивно понятно, что в большинстве случаев при масштабных ЧС будут справедливы два неравенства:  $N_1 \gg N_2$  и  $I_2 \gg I_1$ . Формально, поставленная задача состоит в том, чтобы снизить

величину  $N_1$  до уровня  $L_1$ . Для этого уровня удельные значения  $I_1$  и  $I_2$ , вычисленные в расчете на один вызов, становятся близки друг к другу.

Рассмотрим модель фрагмента ССОП, позволяющую определить потенциальную численность абонентов, которые могут осуществить вызов в "Систему-112". Эта модель показана на рисунке 3.7. Предполагается, что ощущаемые последствия ЧС проявляются в границах круга с радиусом  $R$ . Величина  $R$  определяется, как правило, экспертами МЧС, принимающими участие в работе "Системы-112". Волнистая линия разделяет границы сетей доступа двух АТС, терминалы которых могут находиться в круге радиусом  $R$ . Например,  $ТА_{11}$  и  $ТА_{21}$ , включенные в АТС1 и АТС2 соответственно, расположены в границах круга. Два других терминала ( $ТА_{12}$  и  $ТА_{22}$ ) находятся вне территории с ощущаемыми последствиями ЧС.

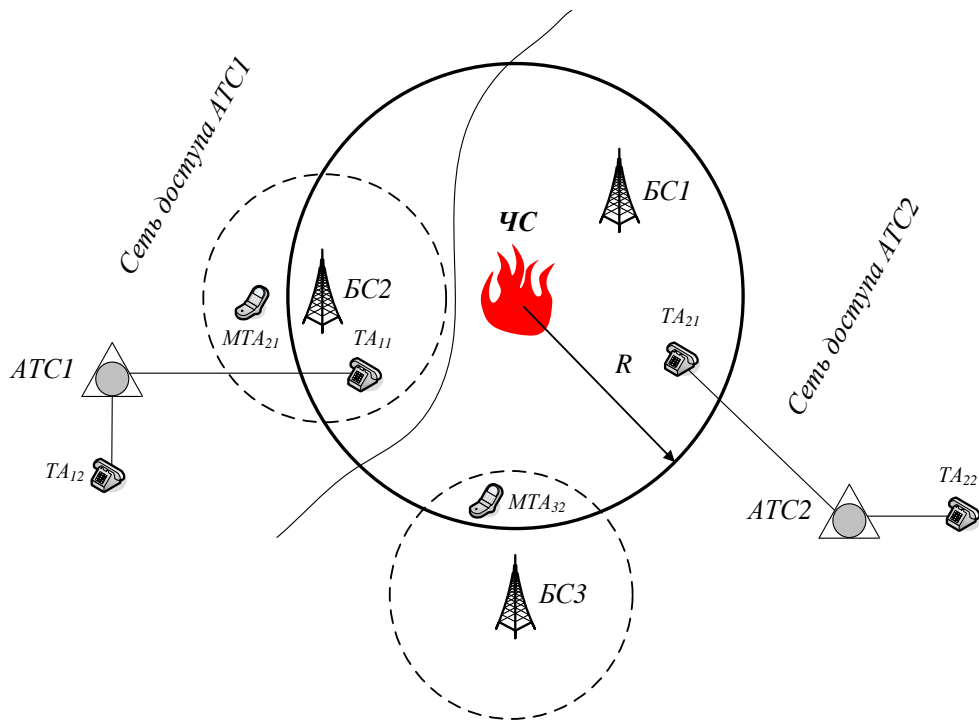


Рисунок 3.7 – Модель фрагмента системы электросвязи

На рисунке 3.7 изображены три БС, которые могут находиться в круге с радиусом  $R$  или располагаться за его пределами. Необходимо определить перечень тех БС, для которых обслуживаемые мобильные телефонные аппараты (МТА), теоретически могут располагаться на территории с ощущаемыми последствиями

ЧС. В частности, БСЗ находится вне круга, но обслуживаемый ею МТА<sub>32</sub> в момент возникновения ЧС пребывает в границах исследуемой территории. Иная ситуация складывается с БС2, которая лежит внутри окружности. Обслуживаемый ею МТА<sub>21</sub> не находится в границах круга.

Очевидно, что основное количество вызовов, определенное выше как  $N_1$ , будет создаваться терминалами, которые расположены в границах круга с радиусом  $R$ . Услуга определения местоположения МТА позволяет составить перечень именно тех терминалов, которые в момент вызова операторов "Системы-112" находятся в границах исследуемой территории. Информация о номере ТА в сети фиксированной телефонной связи позволяет реализовать такую же возможность, которая доступна для МТА.

Обозначим общую численность терминалов фиксированной и мобильной связи, могущих располагаться в круге с радиусом  $R$ , через  $M$ . При поступлении вызовов в "Систему-112" сначала проверяется их принадлежность к множеству  $M$ . Если ответ положителен, то абоненту передается речевое сообщение, суть которого заключается в том, что факт возникновения ЧС уже известен. Абоненту предлагается положить трубку, если он собирался обратиться в "Систему-112" с информацией о возникновении ЧС. Если он может сообщить какие-либо важные подробности или причина его звонка не связана с ЧС, то абоненту рекомендуют дождаться ответа оператора. Тексты речевых сообщений следует составлять на основании заранее разработанных шаблонов [128].

Некоторые абоненты, не имеющие важной дополнительной информации о характере ЧС, положат трубку. Количество таких абонентов с учетом принятых обозначений равно  $N_1 - L_1$ . Для оценки эффективности предлагаемого метода ограничения нагрузки необходимо накопить статистические данные, но в настоящее время такое решение не представляется реализуемым по двум причинам. Во-первых, процесс создания "Системы-112" только начался. Во-вторых, техническая возможность поддержки предлагаемых решений появилась не так давно. Оценить

эффективность предлагаемых решений можно, например, за счет использования метода Делфи [244].

Для получения исходных данных был разработан простой вопросник, который рассылался по электронной почте. Следовательно, были соблюдены ключевые положения метода Делфи, заключающиеся в отсутствии влияния на ответы более авторитетных коллег и мнения большинства респондентов [244]. Полученные ответы обрабатывались общепринятыми статистическими методами [20].

На вопрос: "Прекратите ли Вы попытку дозвониться до оператора, получив речевое сообщение о том, что факт возникновения ЧС известен и принимаются необходимые меры" положительно ответило большинство респондентов – 81%. На похожий вопрос, но относящийся к ожидаемой реакции других абонентов была получена более пессимистическая оценка – 60%. Не были выявлены заметные различия в ответах респондентов из разных возрастных групп. Коэффициент конкордации Кендалла [20, 83] для второй оценки составил 0,896. Такая величина коэффициента конкордации свидетельствует о высокой степени согласованности мнений респондентов.

Для оценки эффективности процедур, позволяющих снизить нагрузку, используются разные подходы. Применительно к "Системе-112" логичным представляется подход, основанный на ценности информации [201]. Предположим, что вероятность достижения цели (снижения количества вызовов, поступающих в ЦОВ) после принятия мер по ограничению нагрузки равна  $p$ . Тогда ценность информации  $W$  при известной априорной вероятности достижения цели до принятия решения  $q$  оценивается следующим соотношением [201]:

$$W = \log_2 \left( \frac{p}{q} \right). \quad (3.35)$$

Отношение  $L_1$  к  $N_1$  можно рассматривать как оценку величины  $p$ . При проведении вычислений в качестве значения  $p$  следует использовать обе оценки, полученные в результате проведенного опроса. Вероятность  $q$  допустимо тракто-



вать как  $1 - \rho$ , где  $\rho$  – нормированная загрузка ЦОВ, меняющаяся от нуля до единицы.

На рисунке 3.8 приведена зависимость ценности информации  $W$  от загрузки  $\rho$ . Очевидно, что вне зависимости от единицы измерения ценности информации при повышении загрузки предлагаемые решения демонстрируют свою эффективность. Последнее утверждение основано на следующем факте. Если не предпринимать мер по ограничению трафика, то можно считать, что  $p = q$ . Это значит, что  $W \equiv 0$ . Очевидно, что при малых значениях загрузки не исключена ситуация, когда  $W < 0$ . Это неравенство можно трактовать так: при малой загрузке введение речевой подсказки не только не дает положительного эффекта, но и увеличивает время занятия разговорного тракта.

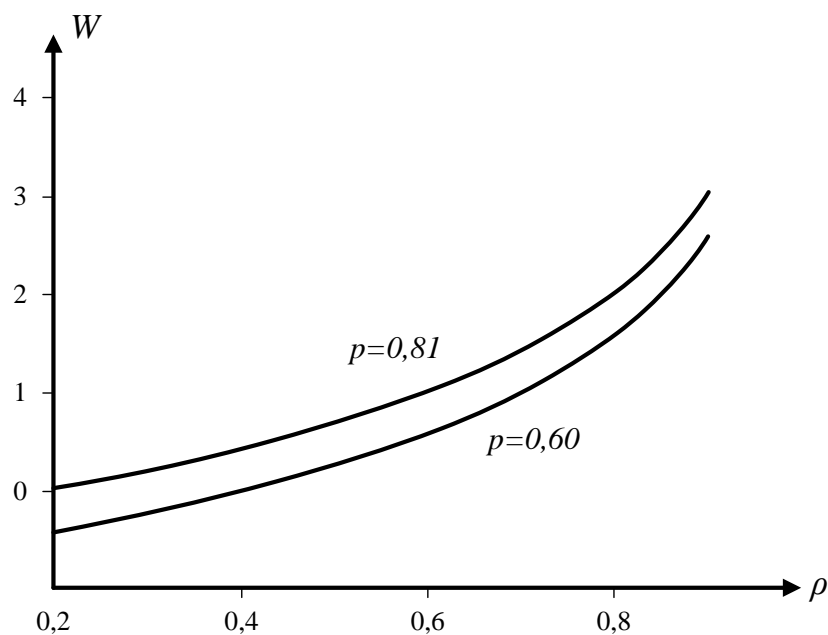


Рисунок 3.8 – Ценность информации как функция загрузки ЦОВ

После реализации предлагаемого метода ограничения нагрузки в аппаратно-программных средствах ЦОВ должна собираться статистика, которая позволит оценить его эффективность с практической точки зрения. Не исключено, что потребуются введение каких-либо коррекций в алгоритм ограничения нагрузки, а также в формулировки речевых сообщений, передаваемых абонентам. Требуется учитывать и тот факт, что предварительные опросы респондентов, используемые

для получения исходной информации, проводятся при отсутствии влияния каких-либо стрессовых факторов [39, 128, 145].

Даже при использовании предложенного метода ограничения нагрузки, которая возрастает в результате возникновения масштабной ЧС, количество вызовов, остающихся в очереди и ожидающих обслуживания, в некоторых случаях может оставаться весьма существенным. Необходимо, чтобы операторы ЦОВ обслуживали не только вызовы, обусловленные масштабной ЧС, но и другой трафик. Для этого следует изменить дисциплину выбора из очереди ожидающих вызовов для их обслуживания операторами ЦОВ.

Для каждого типа масштабной ЧС можно определить территорию площадью  $S_{ЧС}$ , в границах которой расположены абоненты, обращающиеся в Систему-112. Эта величина всегда меньше, чем площадь  $S_{ЦОВ}$ , которую обслуживают операторы Системы-112. Анализ информации о номере стационарного телефонного аппарата и местоположении мобильного терминала позволяет идентифицировать входящие вызовы, осуществляемые в границах территории с площадью  $S_{ЧС}$ . Ранее причина вызова не известна. С некой вероятностью  $p$  вызов связан с масштабной ЧС. Следовательно, с вероятностью  $1 - p$  вызов обусловлен иной причиной. Необходимо сортировать вызовы, поступающие в ЦОВ. Эта процедура должна обеспечить обслуживание вызовов, которые поступают от абонентов, находящихся как в границах территории с площадью  $S_{ЧС}$ , так и за ее пределами.

Рассматриваемый процесс можно формализовать при помощи модели, принятой в теории телетрафика для систем с ожиданием, в которых длина очереди ограничена. Ограничение очереди обусловлено не стоимостными соображениями, а прагматическими аспектами функционирования ЦОВ. Переполнение буферной памяти, если очередь технически не лимитирована, ухудшает качество обслуживания вызовов.

На рисунке 3.9 показаны  $N$  обслуживающих приборов (ими служат рабочие места операторов ЦОВ), очередь, формируемая заявками (входящими вызовами), и две группы источников нагрузки. Первая группа расположена в границах терри-

тории с площадью  $S_{\text{ЦОВ}}$ . Параметры входящего потока определяются интенсивностью поступления заявок  $\lambda_1$  и коэффициентом вариации соответствующего распределения  $C_{A1}$ . Вторая группа находится вне территории с площадью  $S_{\text{ЦС}}$ . Для нее параметры входящего потока заявок заданы парой  $\lambda_2$  и  $C_{A2}$ .

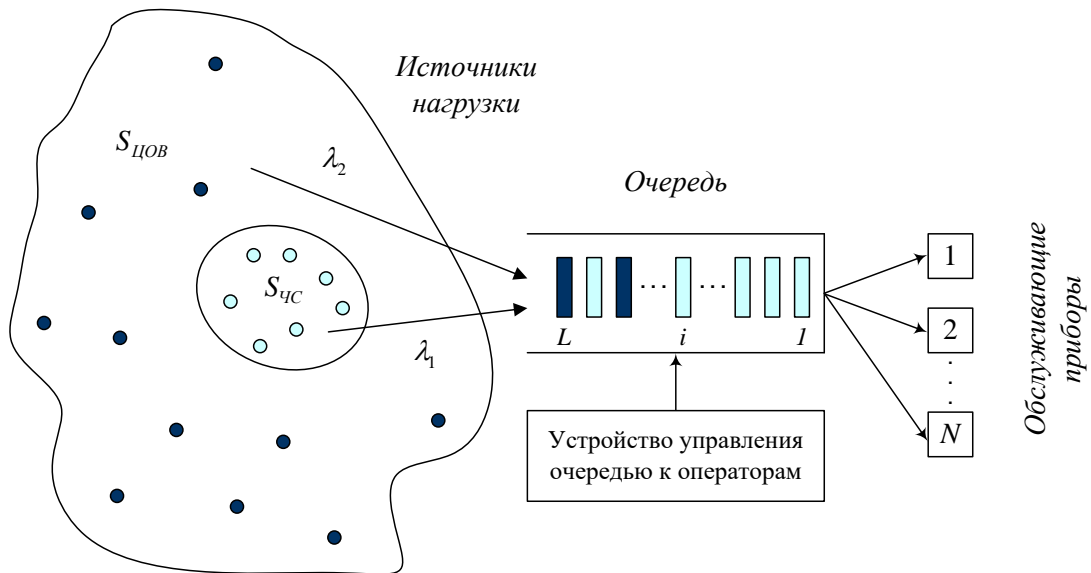


Рисунок 3.9 – Модель сортировки вызовов, поступающих в ЦОВ

Допустимая длина очереди составляет  $L$  заявок. Следовательно, в рассматриваемой СМО может находиться не более  $L + N$  заявок. Если в СМО уже находится  $L + N$  заявок, то все вновь поступающие заявки будут теряться. Устройство управления очередью к операторам может сортировать заявки, то есть менять дисциплину обслуживания, которая в обычных условиях функционирования ЦОВ определяется правилом "первой пришла – первой обслужена".

В очереди  $i$ -я заявка может относиться как к первому, так и ко второму потоку. Информация о принадлежности каждой заявки к одному из двух потоков содержится в устройстве управления очередью к операторам. Возникающая задача может быть сформулирована как выбор алгоритма сортировки вызовов. Частным случаем такого алгоритма будет выделение на некоторый период времени двух групп операторов численностью  $N_1$  и  $N_2$  для отдельного обслуживания заявок первого и второго потоков. Такое решение может оказаться разумным с точки зрения включения в состав группы  $N_1$  операторов, способных эффективно реа-

гировать на информацию, которая специфична для конкретного вида ЧС. Очевидно, что всегда справедливо такое равенство:  $N_1 + N_2 = N$ .

Критерием выбора удачной дисциплины обслуживания (с технической точки зрения) служит близость вероятностей потери вызова для обоих потоков, обозначаемых  $\pi_1$  и  $\pi_2$  соответственно. В качестве альтернативного или дополнительного критерия можно выбрать близость средних значений времени ожидания начала обслуживания –  $W_1^{(1)}$  и  $W_2^{(1)}$ .

Для получения приближенных оценок упростим исследуемую модель, используя следующие предположения:

- на вход двух СМО поступают простейшие потоки с величинами интенсивности  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ;
- время обслуживания заявок обоих потоков – случайная величина, распределенная для каждой СМО по экспоненциальному закону с интенсивностью  $\mu$ ;
- потоки заявок обслуживаются двумя группами операторов численностью  $N_1$  и  $N_2$ ;
- в каждой СМО используется дисциплина обслуживания заявок "первой пришла – первой обслужена".

Если предположить, что количество мест для ожидания в очереди не ограничено, то поставленная задача решается численно на основе известных формул [79]. Следует учитывать, что существует некоторое значение  $N_{\min}$ , ниже которого величина  $N_2$  опускаться не может даже в тех случаях, когда  $\lambda_1 \gg \lambda_2$ . С учетом этого обстоятельства использование упомянутых выше формул позволяет ввести следующее правило:

$$N_2 = N \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}, \quad N_1 = N - N_2, \quad \text{если } N_2 > N_{\min}$$

$$N_2 = N_{\min}, \quad N_1 = N - N_{\min}, \quad \text{если } N \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \leq N_{\min}$$
(3.36)

Поскольку значения  $N_1$  и  $N_2$  могут быть только целыми числами, то вероятности  $\pi_1$  и  $\pi_2$  будут близки друг к другу, но не одинаковы. Этот вывод остается справедливым для величин  $W_1^{(1)}$  и  $W_2^{(1)}$ . Таким образом, выбор дисциплины обслуживания заявок сводится к организации двух очередей, а распределение ресурсов (с практической точки зрения – формирование двух групп операторов ЦОВ) должно осуществляться на основании соотношений (3.36).

При постановке прикладных задач необходимо учитывать, что  $L_i < \infty$ . Для расчета СМО с пуассоновскими входящими потоками и ограниченным количеством мест для ожидания в очереди также известны соотношения, позволяющие рассчитать значения  $\pi_1$  и  $\pi_2$ , а также  $W_1^{(1)}$  и  $W_2^{(1)}$ . Все необходимые формулы приведены, например, в [230]. Они весьма громоздки и в текст данного раздела не включены. Вычисления по этим формулам показывают, что правило выделения ресурсов для двух отдельных очередей остается неизменным, то есть определяется соотношениями (3.36).

Во многих случаях, как показывают результаты измерений, распределение  $A_1(t)$  будет заметно отличаться от пуассоновского закона. Тогда применение соотношений (3.36) может привести к неверным выводам. Для корректного выбора решений по разделению доступного количества обслуживающих приборов на слагаемые  $N_1$  и  $N_2$  была разработана имитационная модель, позволяющая менять характер распределений  $A_1(t)$  и  $A_2(t)$ , варьируя величины их коэффициентов вариации –  $C_1$  и  $C_2$  соответственно.

Для моделирования выбирались распределения со значениями коэффициентов вариации в диапазоне  $0 \leq C_i \leq 5$ ,  $i = \overline{1, 2}$ . Обработка полученных результатов позволила уточнить правило (3.36) для произвольных законов распределений  $A_1(t)$  и  $A_2(t)$ . Если  $N_2 > N_{\min}$ , то величину  $N_1$  можно оценить по следующей эмпирической формуле:

$$N_1 = N \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot \frac{1 + \sqrt{C_1}}{1 + \sqrt{C_2}}, \quad N_2 = N - N_1. \quad (3.37)$$

Правила (3.36) и (3.37) остаются неизменными при произвольном, но одинаковом распределении длительности обслуживания заявок. Этот вывод интуитивно понятен, но в данной работе он был подкреплён результатами моделирования.

Для некоторых видов ЧС выделение двух групп операторов не имеет практического смысла. В подобных случаях необходимо выбрать алгоритм сортировки вызовов, находящихся в общей очереди. Количество мест для ожидания в очереди  $L$  логично рассматривать как сумму  $L_1 + L_2$ , в которой слагаемые определяют численность заявок из первого и второго потоков соответственно. Можно использовать несколько алгоритмов сортировки, среди которых особый интерес связан с двумя процедурами извлечения заявок на обслуживание:

- чередование заявок из разных потоков без учета размера и качественного состава очереди;
- применение алгоритма, выбирающего следующую заявку с учетом отношения  $\lambda_1$  к  $\lambda_2$ .

Для оценки величин  $\pi_1$ ,  $\pi_2$ ,  $W_1^{(1)}$  и  $W_2^{(1)}$  была использована та же имитационная модель, дополненная предлагаемыми алгоритмами сортировки заявок. Входящие потоки выбирались из распределений, которым присущи так называемые "длинные хвосты" [84], то есть проявляющих свойства самоподобия [206]. Длительность обслуживания полагалась случайной величиной со сравнительно небольшим значением коэффициента вариации.

На рисунке 3.10 приведены зависимости вероятности потери вызовов и нормированных средних значений времени ожидания начала обслуживания для первого алгоритма сортировки. Нормирование произведено к среднему значению времени обслуживания вызовов. Следует отметить, что практически для всего исследуемого диапазона отношений  $\lambda_1$  к  $\lambda_2$  соблюдается условие  $\pi_1 \approx \pi_2$ . По этой причине кривая для второго потока не приводится. Для суммарного потока – без использования рассматриваемого алгоритма сортировки – вероятность потери вызовов  $\pi$  несколько выше, но всегда справедливо неравенство такого вида:

$\pi < \pi_1 + \pi_2$ . Время ожидания начала обслуживания для первого потока (его интенсивность равна  $\lambda_1$ ) меньше, чем аналогичная величина для суммарного потока  $W^{(1)}$ . Для второго потока в исследуемом диапазоне отношений  $\lambda_1$  к  $\lambda_2$  соблюдается следующее неравенство:  $W_2^{(1)} > W^{(1)}$ . Правда, соответствующие кривые близки друг к другу. По этой причине зависимость для  $W_2^{(1)}$  на рисунке 3.9 не показана.

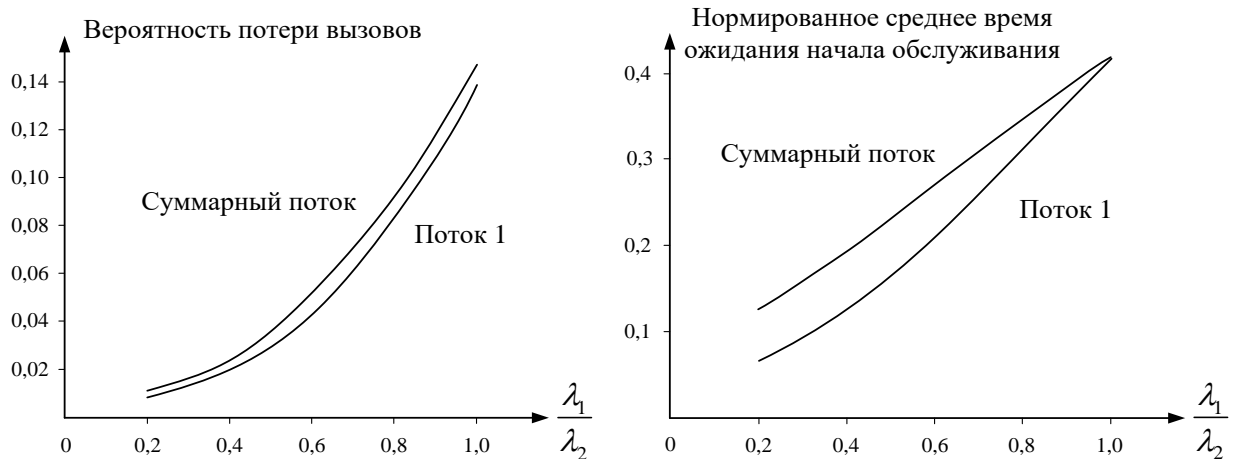


Рисунок 3.10 – Исследуемые характеристики для первого алгоритма сортировки

Зависимости вероятности потери вызовов и нормированных средних значений времени ожидания начала обслуживания для второго алгоритма сортировки очень похожи на кривые, показанные на рисунке 3.10. Различие заключается в ходе кривых, показанных в правой части рассматриваемой иллюстрации. Вместо надписи "Поток 1" следует поставить слова "Поток 2". Это означает, что второй алгоритм сортировки позволяет снизить среднее время ожидания начала обслуживания для вызовов, поступающих от тех абонентов, которые находятся вне территории с площадью  $S_{ЧС}$ .

Для выбора алгоритма сортировки необходим критерий, который определяется процессами, находящимися вне сферы ответственности Оператора связи. Очевидно, что этот критерий опирается на так называемые справедливые алгоритмы [223]. Они обычно рассматриваются для систем с очередями; подобные алгоритмы известны по англоязычному термину *fair queueing algorithm*. Однако существенно раньше подобные алгоритмы изучались для систем с коммутацией ка-

налов. Названия исследуемых дисциплин обслуживания были образованы от слова "равенство" на французском языке – egalite. В частности, в старых публикациях по теории телетрафика встречается словосочетание "эгалитарная дисциплина обслуживания".

В качестве меры справедливости представляется разумным выбрать критерий  $\pi_1 \approx \pi_2$ . Основанием для такого предложения служат эвристические соображения, которые, в свою очередь, основаны на характере обращений в ЦОВ Системы-112. Действительно, идентичность вероятностей потери вызовов представляется более важной, чем близость средних значений времени их пребывания в очереди. По этому критерию рассматриваемые алгоритмы сортировки идентичны. Следовательно, выбор алгоритма может быть основан на простоте его реализации. С этой точки зрения чередование заявок из разных потоков без учета размера и качественного состава очереди представляется предпочтительнее.

Полученные результаты позволяют сформулировать две практические рекомендации для обслуживания трафика, поступающего в Систему-112 при возникновении масштабных чрезвычайных ситуаций. Если характер чрезвычайной ситуации таков, что всех операторов ЦОВ следует разделить на две группы, то такую процедуру следует осуществлять на основании правила (3.37). Если выделение двух групп операторов не требуется, то из очереди следует поочередно извлекать вызовы, генерируемые в границах региона, который обслуживает ЦОВ Системы-112, и в пределах той территории, где ощущаются последствия масштабной чрезвычайной ситуации.

### **3.6 Характеристики потока IP-пакетов, на выходе узла коммутации**

При исследовании процессов обмена IP-пакетами в сети следующего поколения приходится рассматривать математические модели, представляющие собой многофазные системы массового обслуживания. Соответствующие модели рас-



смаатриваются в четвертой главе диссертационной работы, но выходящий поток IP-пакетов формируется в УК. По этой причине характеристики выходящего потока исследуются в этой главе диссертации.

На вход УК поступает поток IP-пакетов, который задан функцией распределения  $A(t)$ . Достоверное распределение  $A(t)$  проще всего получить в процессе измерения. Тогда функция  $A(t)$  будет ступенчатой, для которой элементарно определяются конечные значения математического ожидания  $A^{(1)}$  и дисперсии  $\sigma_A^2$ . Они позволяют вычислить коэффициент вариации данной случайной величины  $C_A$ . Длительность обслуживания IP-пакетов представляет собой постоянную величину  $B^{(1)}$ . Это значит, что дисперсия времени обслуживания  $\sigma_B^2$  и коэффициент вариации  $C_B$  равны нулю.

IP-пакеты могут обрабатываться в УК согласно правилу "Первым пришел – первым обслужен" или на основании предварительно назначенного уровня приоритета. Для выходящего потока это не столь существенно. По этой причине ниже будет рассматриваться дисциплина выбора IP-пакетов на обработку в порядке их поступления на вход УК.

Достаточно найти функцию распределения  $D(t)$ , определяющую длительность интервалов между моментами, когда IP-пакеты покидают УК. Для проведения большей части расчетов, как правило, необходимо найти среднее значение длительности интервала между моментами, в которые IP-пакеты покидают УК  $D^{(1)}$  и коэффициент вариации исследуемой случайной величины  $C_D$ .

Допустимая вероятность потери IP-пакетов между терминалами пользователей для сети следующего поколения нормируется порогом 0,001. Следовательно, для каждого УК в составе сети следующего поколения эта вероятность должна быть меньше. В подобных случаях можно полагать, что потери IP-пакетов во всех УК отсутствуют. Это допущение эквивалентно тождеству  $A^{(1)} \equiv D^{(1)}$  [70]. Далее будем полагать, что для УК справедливо неравенство  $\rho < 1$ .

Таким образом, поставленная задача сводится к поиску величины  $C_D$  для модели УК, которая представляет собой СМО вида  $G/D/1/\infty/f_0$  в классификации Кендалла. В качестве входящего потока заявок исследуются распределения, для которых коэффициент вариации  $C_A$  меняется в широких пределах, обычно превышая значение  $C_A = 1$ , присущее пуассоновскому потоку. Для моделей, в которых  $C_A \leq 1$ , можно получить простое выражение для верхней границы исследуемой величины, считая входящий поток пуассоновским. В этом случае модель вырождается в СМО  $M/D/1/\infty/f_0$ , для которой из приведенной в [70] формулы несложно получить следующее соотношение:

$$C_D = \sqrt{1 - \rho^2}. \quad (3.38)$$

Основные результаты для модели вида  $G/G/1/\infty/f_0$  основаны на приближенных соотношениях. В [88] предложено выражение для оценки величины  $C_D$ , для использования которого следует предварительно рассчитать среднее время ожидания заявок в очереди  $W^{(1)}$ :

$$C_D^2 \approx C_A^2 - 2\rho^2 C_B^2 - 2\rho(1 - \rho) \frac{W^{(1)}}{B^{(1)}}. \quad (3.39)$$

Если подставить в формулу (3.39) соотношение для расчета величины  $W^{(1)}$  в СМО вида  $M/D/1/\infty/f_0$ , то она становится точной, а оцениваемая величина  $C_D$  совпадает с результатом, полученным из (3.38). Для произвольного распределения входящего потока заявок и постоянного времени их обслуживания формула (3.33) упрощается, так как  $C_B = 0$ :

$$C_D^2 \approx C_A^2 - 2\rho(1 - \rho) \frac{W^{(1)}}{B^{(1)}}. \quad (3.40)$$

Очевидно, что должно соблюдаться условие  $C_D \geq 0$ . Оно позволяет определить возможное отношение средних значений  $W^{(1)}$  и  $B^{(1)}$ :

$$\frac{W^{(1)}}{B^{(1)}} \leq \frac{C_A^2}{2\rho(1 - \rho)}. \quad (3.41)$$

Если СМО работает с очень низкой загрузкой, то величина  $W^{(1)}$  близка к нулю. Тогда  $C_D \approx C_A$ . Физический смысл этого выражения очевиден: заявки с входа системы практически всегда попадают на ее выход через постоянное время  $B^{(1)}$ , что не меняет характера функции  $A(t)$ . Если СМО работает в режиме, когда  $\rho \rightarrow 1$ , то поток на выходе СМО  $D(t)$  становится близким к регулярному. Из большой очереди заявки после их обслуживания попадают на выход системы через постоянное время  $B^{(1)}$ . Таким образом, при росте загрузки коэффициент вариации монотонно снижается с величины  $C_A$  до нуля. Всегда соблюдается условие  $C_D \leq C_A$ , что следует считать важным свойством модели с постоянным временем обслуживания заявок в СМО.

Величина  $W^{(1)}$ , согласно [240], для  $C_A > 1$  и постоянного времени обслуживания заявок оценивается по такой формуле:

$$W^{(1)} \approx \frac{\rho B^{(1)} C_A^2}{2(1-\rho)} \exp \left[ -(1-\rho) \frac{C_A^2 - 1}{C_A^2} \right]. \quad (3.42)$$

Подставляя это соотношение в (3.40), можно получить формулу для расчета величины  $C_D$  при условии, что  $C_A > 1$ :

$$C_D^2 \approx C_A^2 \left\{ 1 - \rho^2 \exp \left[ -(1-\rho) \frac{C_A^2 - 1}{C_A^2} \right] \right\}. \quad (3.43)$$

Использование соотношения (3.43) ведет к заметным ошибкам при оценке величины  $C_D$ . В [213] предложена другая формула для оценки величины  $C_D$ , для которой ошибка расчета  $C_D$  снижается. Кроме того, в ней не фигурирует выражение для расчета среднего времени ожидания начала обслуживания:

$$C_D^2 \approx C_A^2 - \rho^2 (C_A^2 - C_B^2). \quad (3.44)$$

Если входящий поток можно считать пуассоновским ( $C_A = 1$ ), а время обслуживания заявок постоянно (тогда  $C_B = 0$ ), то предложенная в [213] аппроксимация и формула (3.38) будут эквивалентными. Для рассматриваемой модели соотношение (3.44) становится проще:

$$C_D^2 \approx C_A^2(1 - \rho^2). \quad (3.45)$$

Результаты имитационного моделирования показывают, что функция вида  $C_D = f(\rho)$  располагается примерно между аппроксимациями (3.43) и (3.44). Этот факт позволил получить, как среднее арифметическое, соотношение, более точно описывающее поведение функции  $C_D = f(\rho)$ :

$$C_D \approx C_A \sqrt{1 - 0,5\rho^2 \left[ 1 + e^{-\frac{(1-\rho)C_A^2 - 1}{C_A^2}} \right]}. \quad (3.46)$$

На рисунке 3.11 показано поведение функций  $C_D = f(\rho)$  для двух значений коэффициента вариации входящего потока –  $C_A = 2$  и  $C_A = 5$ . Функция  $A(t)$  задана распределением Вейбулла. Распределениям вида  $A_i(t)$  соответствуют меньшие значения величины  $C_D$ . Следовательно, для них полученные кривые представляют собой верхние границы функций  $C_D = f(\rho)$ .

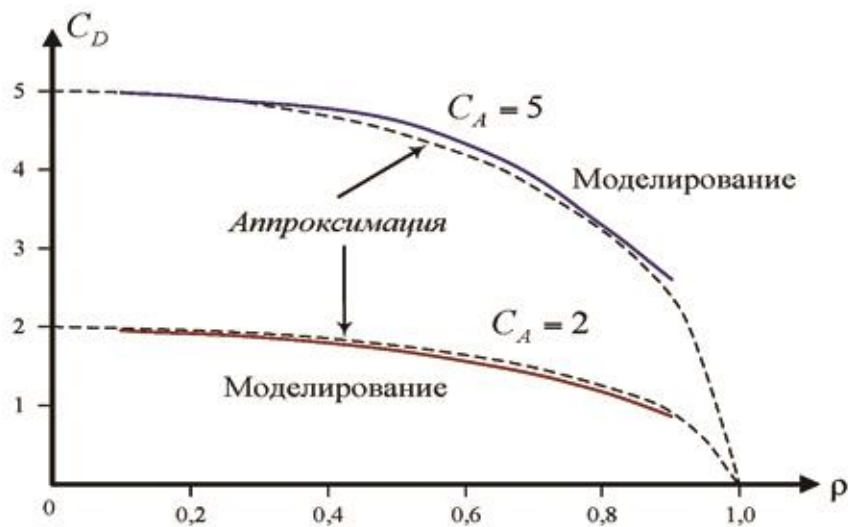


Рисунок 3.11 – Две функции  $C_D = f(\rho)$

Различие приближений (3.43) и (3.45), обозначенное как  $\Delta_D$ , может быть выражено в следующей форме:

$$\Delta_D = \rho^2 C_A^2 \left\{ 1 - \exp \left[ - (1 - \rho) \frac{C_A^2 - 1}{C_A^2} \right] \right\}. \quad (3.47)$$

Величина  $\Delta_D$  близка к нулю при  $\rho \rightarrow 0$  и при  $\rho \rightarrow 1$ . Эта тенденция иллюстрируется графиками, показанными на рисунке 3.12. Они построены для трех значений:  $C_A = 2$ ,  $C_A = 5$  и  $C_A = 10$  как функции загрузки. Все кривые нормированы к величине  $C_A$ . Зависимости  $\Delta_D / C_A$  иллюстрируют схожесть приближений для коэффициента вариации выходящего потока при крайних значениях загрузки  $\rho$ . Эта тенденция, по всей видимости, характерна только для СМО с постоянным временем обслуживания заявок.

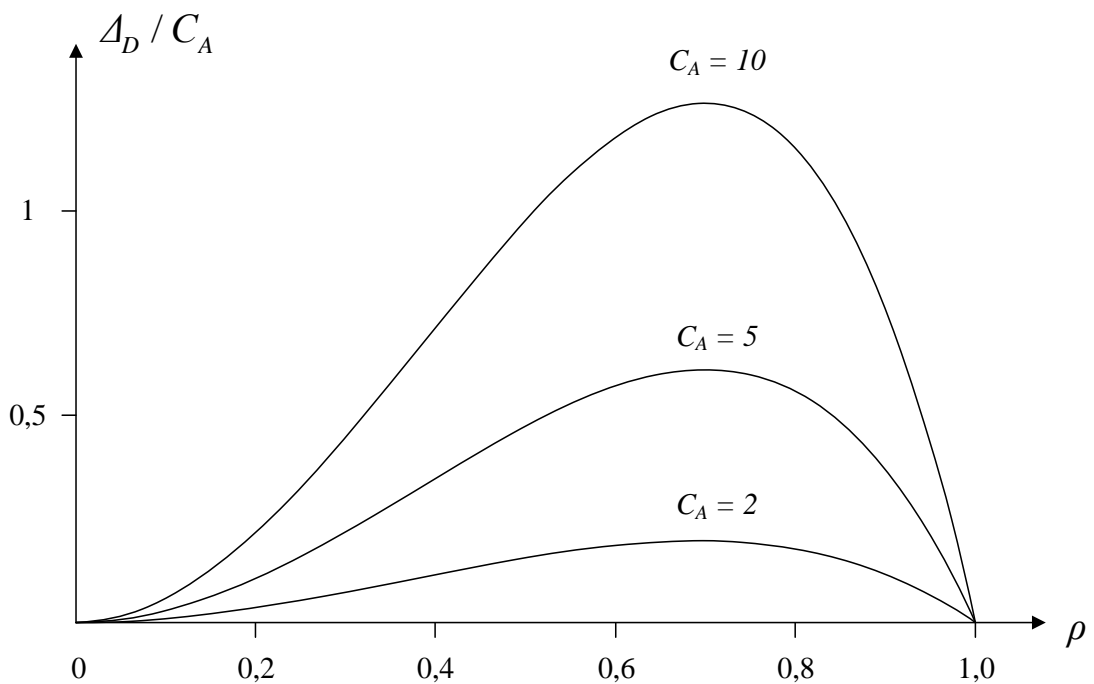


Рисунок 3.12 – Поведение трех функций  $\Delta_D / C_A = f(\rho)$

Для NGN полученные результаты позволяют оценить две важные характеристики выходящего потока IP-пакетов из УК: интенсивность и коэффициент вариации. Интенсивность выходящего потока равна интенсивности входящего потока, если узел коммутации обеспечивает выполнение требований в части допустимой вероятности потери IP-пакетов. Коэффициент вариации с точностью, приемлемой для задач планирования сети, может быть найден из выражения (3.43), но формула (3.44) все же остается предпочтительнее.

### 3.7 Выводы по главе 3

1. После возникновения чрезвычайной ситуации характер трафика, поступающего в узлы коммутации NGN, заметно меняется. Этот факт подтверждают статистические данные, полученные в разных странах, и результаты проведенных измерений. Изменение характера трафика стимулирует проведение исследований, конечная цель которых заключается в разработке практических рекомендаций по приемлемому уровню функционирования телекоммуникационной системы.

2. Математической моделью узла коммутации NGN служит система теле-трафика, обозначаемая в классификации Кендалла нотацией следующего вида:  $GI/G/1/r/f_j$ . Символ "G" в первой позиции указывает на произвольный характер поступающего потока заявок, под которыми для узла коммутации понимаются IP-пакеты. Как правило, функция распределения длительности интервалов между моментами поступления соседних заявок описывается законом с коэффициентом вариации, превышающим единицу. Время обслуживания заявок (обработки IP-пакетов) может считаться постоянной величиной. Это означает, что второй символ в нотации Кендалла может быть заменен буквой "D". Цифра "1" указывает на тот факт, что узел коммутации представляет собой один обслуживающий прибор. Количество мест для ожидания в очереди равно  $r$ ; в ряде случаев можно считать, что эта величина не ограничена. Если нижний индекс " $j$ " в последней позиции используемого обозначения модели равен нулю, то заявки обслуживаются в порядке их поступления. Если  $j=1$ , то заявки обслуживаются с относительными приоритетами.

3. Исследование вероятностно-временных характеристик узла коммутации при помощи упрощенных моделей позволило выявить основные закономерности его работы при условиях, свойственных ЧС. В частности, установлено, что применение гипотезы о пуассоновском входящем потоке приводит к чрезмерно

большим ошибкам при оценке основных показателей функционирования узла коммутации в составе NGN – среднего времени переноса IP-пакетов  $IPTD$  и вариации задержки IP-пакетов  $IPDV$ . По этой причине необходимо исследовать более сложные модели узла коммутации.

4. Для исследования вероятностно-временных характеристик узла коммутации в модели вида  $GI/G/1/r/f_j$  были выделены типичные значения основных атрибутов. В результате для дальнейшего анализа предложено семнадцать конкретных моделей узла коммутации, позволяющих детально изучить поведение узла коммутации NGN в различных условиях его функционирования. Для наиболее интересных, с практической точки зрения, моделей получены выражения, которые позволяют оценить нормированные показатели  $IPTD$  и  $IPDV$ . Важным теоретическим выводом, полученным в процессе исследований, можно считать следующий: максимальная задержка заявок (IP-пакетов) наблюдается не для распределений с так называемыми "тяжелыми хвостами", как принято считать в ряде публикаций. Наиболее существенные задержки заявок свойственны распределениям, которые заданы на ограниченном отрезке времени, то есть вообще не имеют "хвостов".

5. Для проверки аналитических оценок  $IPTD$  и  $IPDV$  была разработана имитационная модель узла коммутации. Эта модель позволяет исследовать поведение узла коммутации при различных значениях параметров трафика и дисциплин обработки IP-пакетов. Результаты моделирования показали, что полученные аналитические соотношения оценивают показатели  $IPTD$  и  $IPDV$  с относительной ошибкой порядка 10%, что вполне приемлемо для решения задач, поставленных в диссертационной работе.

6. При возникновении чрезвычайных ситуаций возрастает роль центра обработки вызовов, поступающих к операторам экстренных оперативных служб. В случае масштабных чрезвычайных ситуаций возникает лавинообразный рост трафика, что резко снижает эффективность работы экстренных оперативных служб. Для минимизации последствий подобных ситуаций разработан алгоритм, апроби-

рованный, запатентованный и реализованный на практике. Он позволяет снизить непроизводительный трафик при возникновении масштабных чрезвычайных ситуаций на 80%. Даже такое снижение трафика в ряде случаев не позволяет достичь высокой эффективности работы операторов в центре обслуживания вызовов. Для решения этой задачи был разработан способ сортировки входящих вызовов, основанный на использовании справедливых алгоритмов. Предложенный способ сортировки основан на установлении правила выбора из общей очереди вызовов из зоны, в которой ощущаются последствия масштабной чрезвычайной ситуации, и из остальной территории субъекта Российской Федерации или муниципального образования.

7. Важная характеристика узла коммутации – функция распределения длительности интервалов между IP-пакетами, которые уже обработаны. Поток таких IP-пакетов (заявок) называют выходящим. Аналитическое исследование выходящего потока заявок при помощи предложенных в диссертационной работе моделей позволило определить две его важные численные характеристики: среднее значение между моментами ухода заявок из узла коммутации и коэффициент вариации этой же случайной величины. Имитационное моделирование подтвердило корректность результатов, полученных аналитически.



## **4. Характеристики качества функционирования сети связи следующего поколения при чрезвычайных ситуациях**

### **4.1 Особенности работы сети связи следующего поколения в условиях ЧС**

В этом разделе рассматриваются особенности функционирования NGN, которые характерны для телекоммуникационной системы, сохраняющей свою целостность. Проблемы, возникающие с обслуживанием мультисервисного трафика, обусловлены существенным ростом потоков IP-пакетов при неизменных значениях пропускной способности транспортных ресурсов и производительности систем распределения информации.

Количественные и качественные изменения трафика объясняются несколькими причинами. Их можно разделить на две группы. В первую группу входят причины объективного характера. Их типичный пример – новые информационные потоки, порождаемые пользователями, которые задействованы в ликвидации последствий ЧС. Причины субъективного характера образуют вторую группу. Для нее характерным примером является возникновение паники [14], что подтверждается статистической информацией, хранящейся в системе учета каждого УК, который входит в состав ТфОП.

Задачи оценки параметров трафика и их прогнозирования для телефонной и телеграфной сетей не представляются сложными благодаря результатам статистических исследований, проводимых в течение нескольких десятилетий. Решение подобных задач для сетей телеграфной и телефонной связи упрощается и вследствие того, что пропускная способность используемых каналов (для аналоговых технологий) и скорость обмена информацией (для цифровых технологий) практически не меняются. Для NGN скорость обмена информацией на ИПС варьируется в широких пределах. Это усложняет задачи по оценке параметров и прогнозирования трафика.

Еще более сложной проблемой становится оценка параметров трафика в период действия ЧС. NGN только начинает формироваться; следовательно, еще не накоплен достаточный объем статистических данных для прогнозирования трафика в условиях ЧС, который порождается редкими событиями. В подобных случаях для решения задач прогнозирования могут быть использованы подходящие аналоги. Весьма продуктивным считается также использование методов, основанных на междисциплинарных и трансдисциплинарных подходах [37, 141].

Для оценки параметров и прогнозирования трафика в период действия ЧС может быть выбрано несколько аналогов. Они могут быть заимствованы из накопленных ранее статистических сведений о ЧС для сетей электросвязи, которые не относятся к классу NGN. Можно также использовать аналоги, которые напрямую не связаны с ЧС. Принципы выбора таких аналогов должны быть основаны на сходстве последствий изменения трафика.

По всей видимости, трафик, возникающий в ЧС и отражающийся на работе тех сетей, которые не относятся к NGN, представляет собой характерный аналог. В качестве примера явления, повлиявшего на работу телефонных сетей в ряде регионов европейской части России, можно назвать "ледяной дождь". Соответствующая статистика была собрана в 2010 году.

Другим аналогом можно считать услугу "Прямая линия", входящую, в частности, в перечень функциональных возможностей Интеллектуальной сети. Трафик, порождаемый этой услугой, можно рассматривать как реакцию абонентов на событие [172]. Здесь прослеживается аналогичная природа с ЧС, также представляющей собой редкое событие, которое порождает специфический трафик.

В качестве иного аналога, позволяющего оценить некоторые параметры возникающего трафика, можно использовать результаты исследования разрушающих воздействий различного рода и соответствующую статистику [13]. Этот подход позволяет получить ряд полезных численных оценок. Интересные статистические данные могут быть получены за счет анализа трафика, обрабатываемого центрами обслуживания вызовов, которые поступают на рабочие места операторов экстренных оперативных служб.

До анализа трех аналогов, перечисленных выше, необходимо проанализировать качественные аспекты трафика в ЧС с точки зрения пирамиды потребностей, предложенной Абрахамом Маслоу [139]. Результаты использования этой пирамиды для разработки тарифной политики [189] свидетельствуют об эффективности ее применения. Исследования пирамиды потребностей следует отнести к упомянутому выше междисциплинарному подходу.

До появления всемирной паутины основная функция сетей электросвязи, поддерживающих режим диалога, заключалась в поддержке коммуникативных потребностей. В пирамиде Маслоу они относятся к группе социальных потребностей – третий уровень на рисунке 4.1. Важная особенность NGN заключается в высокой эффективности поддержки услуг, связанных с первым, вторым и четвертым уровнями пирамиды потребностей. Наибольший интерес связан с четвертым уровнем, то есть с потребностями в безопасности в контексте событий, вызванных конкретными видами ЧС.



Рисунок 4.1 – Пирамида потребностей и сети электросвязи

Так как потребности в безопасности – до ликвидации последствий ЧС – становятся доминирующими, максимальные усилия телекоммуникационных ком-

паний следует направить на обеспечение обслуживания соответствующего трафика. Следовательно, в период действия ЧС необходимо пересмотреть нормы на качество обслуживания мультисервисного трафика, установленные, например, рекомендацией ITU-T Y.1541. Метод решения этой задачи изложен в разделе 4.5.

Анализ статистической информации по работе СДЭ в условиях ЧС выявил заметные различия в основных параметрах трафика [95]. В частности, следует акцентировать внимание на таких моментах:

- количество сообщений возрастает до 8 раз по сравнению со временем, когда отсутствуют ЧС;
- средняя длина сообщений увеличивается в 7 раз и более;
- асимметричность трафика повышается до 16 раз;
- до 30% всех сообщений принадлежит к разряду приоритетных, а 25% – к классу циркулярных;
- чаще наблюдается перегрузка сети и нарушение нормированных показателей качества обслуживания трафика.

Эти данные очень полезны для оценки параметров трафика и их прогнозирования в NGN при возникновении ЧС. Однако их нельзя механически "переносить" на сеть, построенную на современных технологиях и обладающую новыми функциональными возможностями. СДЭ (в первую очередь – по обмену телеграфными сообщениями) не имеют такой возможности управления ресурсами, которая присуща NGN. Следует учитывать и ряд других особенностей NGN, определяемых теми ее функциями, которые весьма эффективны при возникновении ЧС. Это позволяет сформулировать совокупность гипотез, которые, по крайней мере, на качественном уровне могут быть использованы для описания трафика NGN в условиях ЧС:

- количество сеансов связи может возрасти в несколько раз по сравнению со временем, когда отсутствуют ЧС;
- объем передаваемой информации будет увеличиваться и в нем, по всей видимости, произойдет изменение соотношений трафика речи, данных и видео, а также доли циркулярных сообщений;

- будут чаще наблюдаться периоды перегрузки сети и невыполнение нормированных показателей качества обслуживания трафика.

Важная статистика была собрана по отказам объектов ТфОП вследствие "ледяных дождей". Объектом в данном случае является местная телефонная станция в сельской местности. Отказы, в основном, были вызваны длительными перерывами в электроснабжении; следовательно, порождены внешними причинами.

На рисунке 4.2 приведена гистограмма, которая показывает количество отказавших объектов за те дни, когда наблюдались "ледяные дожди". Очевидно, что характер распределения отличается от типичных законов, которые обычно рассматриваются при исследовании случайных величин.



Рисунок 4.2 – Количество отказавших объектов из-за "ледяных дождей"

В частности, на диаграмме имеется несколько явно выраженных всплесков. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что подбор аппроксимации для количества отказавших объектов с использованием привычного набора ФР для случайных величин не позволит провести точный анализ исследуемых характеристик.

За период выпадения "ледяных дождей" в состоянии отказа находилось 524 объекта. Среднее количество отказавших объектов за сутки оценивается как

29,11. Стандартное отклонение этой случайной величины равно примерно 23,70. Разброс количества отказавших объектов определяется таким диапазоном: [3, 77]. Минимальная и максимальная численность абонентов, оставшихся без телефонной связи, составляла соответственно 260 и 23918.

Для оценки параметров и прогнозирования трафика, обслуживаемого NGN, очень важны принципы взаимодействия – в широком смысле этого понятия – двух телекоммуникационных систем: созданных Операторами связи и специального назначения, используемых для решения возникающих задач.

Характеристики трафика, обслуживаемого при поддержке услуги "Прямая линия", приведены в [103, 142]. Полученные результаты полезны с двух точек зрения. Во-первых, опыт организации обработки вызовов при помощи специально подготовленного персонала и применения автоответчиков может быть использован для максимизации пропускной способности сети. Во-вторых, характер трафика при поддержке услуги "Прямая линия" представляется типичным, так как отражает реакцию абонентов на событие.

Обработка статистических данных, результаты которой изложены в [103, 142], показала, что поток вызовов лучше всего может быть представлен с помощью распределения Лапласа [19] и он не обладает свойством самоподобия [206]. Данный вывод подтвержден использованием критерия Колмогорова-Смирнова [15]. Также вполне приемлемы модели, основанные на распределениях Коши и Симпсона [19]. Распределению Симпсона свойственны две особенности:

- ограниченный интервал времени, на котором оно задано;
- возможность использования различной асимметричности.

Плотность распределения Симпсона  $f(t)$  с параметрами  $a$ ,  $b$  и  $m$  показана на рисунке 4.3. Для аппроксимации функции  $f(t)$  можно использовать, например, распределение Эрланга  $k$  – го порядка [19]. Величина  $m$  определяет моду распределения. В качестве точки  $m$  для аналога следует выбрать время начала "прямого эфира".

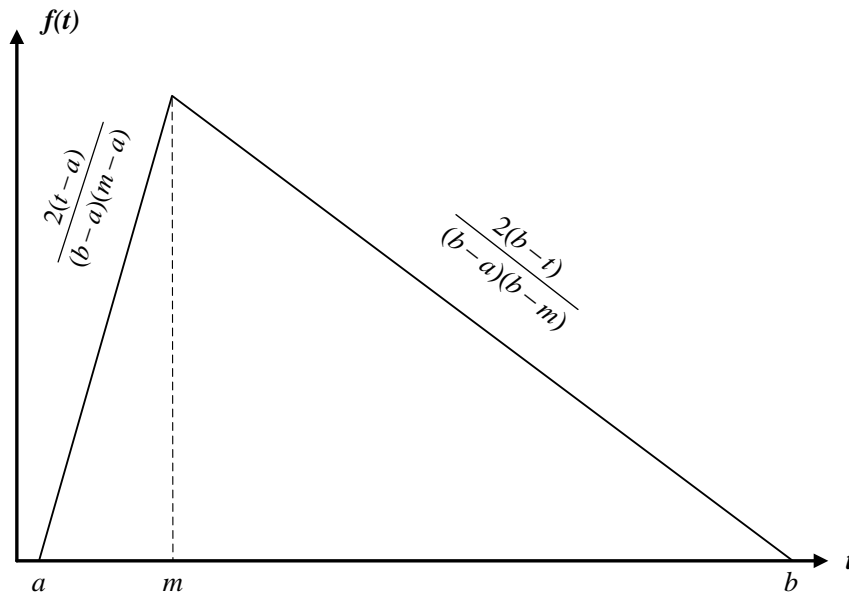


Рисунок 4.3 – Модель, описывающая количество вызовов для трафика в ЧС

При возникновении ЧС начинает расти трафик, направляемый в ЦОВ экстренных оперативных служб. Очевидно, что отрезок  $[a, m)$  будет сравнительно коротким, так как многие абоненты сразу же после наступления ЧС начнут обращаться в ЦОВ. Иными словами рост трафика будет весьма существенным. Отрезок  $[m, b]$  будет длиннее. Скорость снижения трафика предполагается линейной функцией времени. Основная задача, которую приходится решать в ЦОВ, заключается в максимизации доли обслуженного трафика в окрестности точки  $m$ . Решение данной задачи основывается на междисциплинарном подходе, так как необходимо учесть психологические факторы, способные заметно повлиять на параметры обслуживаемого трафика.

Результаты, полученные для услуги "Прямая линия", полезны, в первую очередь, для оценки параметров и прогнозирования трафика, который обрабатывается в ЦОВ рассматриваемого типа. Они позволяют обосновать выбор адекватного закона распределения количества вызовов, направляемых по номеру "112", который в противном случае обычно базируется на эвристических соображениях.

Соображения, изложенные выше, свидетельствуют, что параметры трафика в NGN при возникновении ЧС могут меняться в широких пределах. Данное обстоятельство обусловлено, как минимум, тремя видами неопределенности:

- параметры трафика NGN меняются со временем весьма существенно и зависят от большого количества факторов;
- масштабы разрушающих воздействий, вызванных последствиями ЧС, плохо предсказуемы и могут в разной степени менять как структуру сети, так и пропускную способность ее компонентов;
- поведение потенциальных абонентов NGN в период ликвидации последствий ЧС плохо прогнозируемо, а механизмы управления трафиком на основе законов психологии только начинают разрабатываться.

По этим причинам для оценки параметров трафика следует использовать сценарный подход [134]. Представляется логичным применить квартильный анализ, выделив пять градаций отказавшей части ресурсов NGN  $p$ : 0%, 25%, 50%, 75% и 100%. Обе крайние точки не представляют практического интереса. Их лучше заменить близкими значениями, но имеющими смысл для последующего анализа (например, величинами 5% и 95%).

Для оценки параметров трафика необходимо выбрать меру производительности и/или пропускной способности компонентов NGN. В [191] для решения ряда задач методами теории телетрафика предложена единица канального ресурса. Применительно к рассматриваемым вопросам можно ввести схожую меру, которая далее называется единицей ресурса NGN. В обычных (штатных) условиях эксплуатации она равна средней загрузке  $\rho_i$  узла коммутации NGN или тракта обмена IP-пакетами, принятой при разработке проектных решений. При возникновении ЧС объем трафика для  $i$ -го компонента NGN оценивается как  $k_i \cdot \rho_i$ . Коэффициент  $k_i$  учитывает увеличение трафика после возникновения ЧС. Очевидно, что  $k_i \geq 1$ , а  $\rho_i < 100\%$ .

На рисунке 4.4 изображены эллипсы, иллюстрирующие вероятные изменения объема трафика на единицу ресурса NGN для пяти предложенных градаций отказов. Если объем трафика на единицу ресурса NGN превышает уровень в 100%, то сеть или ее фрагмент находится в состоянии перегрузки.



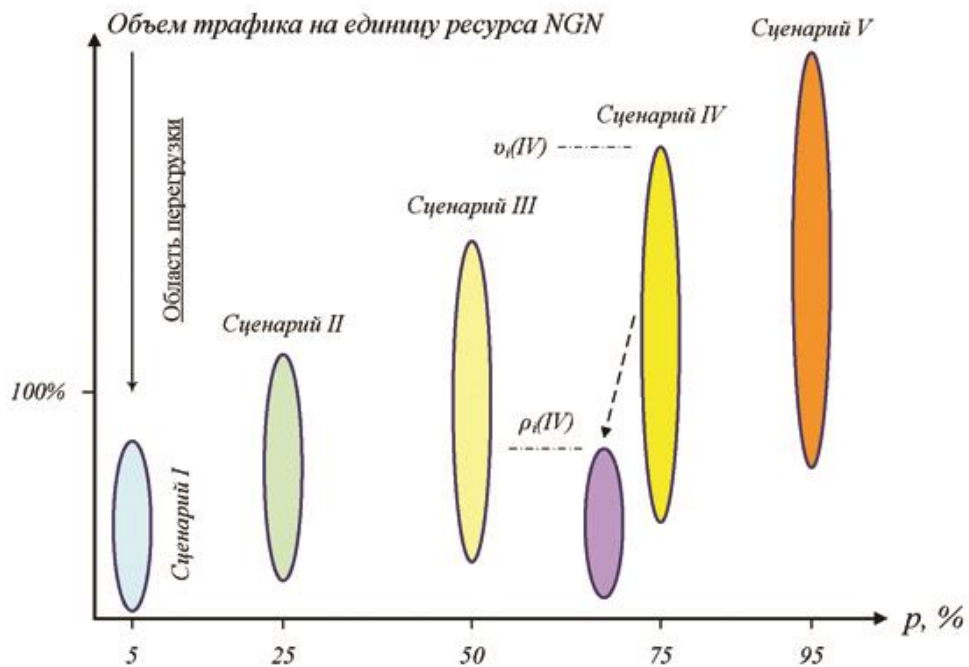


Рисунок 4.4 – Наиболее вероятные области изменения трафика NGN при ЧС

Для сценария IV пунктирной линией показана стрелка к эллипсу, который отображает ожидаемый эффект от мероприятий по управлению потоками IP-пакетов в NGN при возникновении ЧС. Этот эффект заключается в снижении объема трафика на единицу ресурса NGN с максимума  $v_i(IV)$  до уровня  $\rho_i(IV)$ . Следовательно, одна из основных задач по оценке параметров трафика сводится к поиску величин  $v_i(j)$  для значений  $j$  от II до V. Решение этой задачи может быть выполнено путем анализа структуры NGN, которая формируется после наступления ЧС, и прогнозов трафика.

Вторая задача – оценка характера трафика  $v_i(j)$  с точки зрения всех видов передаваемой информации и их важности в период ликвидации последствий ЧС. В результате, трафик ранжируется по приоритетам на период ликвидации последствий ЧС. Тогда каждая величина  $v_i(j)$  представима как сумма  $V_1(j) + V_2(j) + \dots + V_r(j)$ , в которой значение  $r$  равно количеству введенных рангов.

Третья задача заключается в выборе приемлемых ограничений трафика вида  $V_k(j)$  с учетом важности передаваемой информации в период ликвидации послед-

ствий ЧС. Эти ограничения могут касаться количества сеансов связи и их длительности для всех абонентов или некоторой их части. В общем случае можно выделить последовательность  $L_1(j), L_2(j), \dots, L_r(j)$ , которая содержит все вводимые ограничения.

Предлагаемый подход может быть реализован с использованием современных методов теории телетрафика [229]. Представляет интерес и применение когнитивных технологий [255], позволяющих "обучать" телекоммуникационную систему для достижения оптимальной реакции на изменение трафика при возникновении ЧС.

#### 4.2 Модель маршрута обмена IP-пакетами при ЧС и ее анализ

С точки зрения теории телетрафика NGN следует рассматривать как СеМО. В составе СеМО практический интерес представляет набор маршрутов, по которым перемещаются заявки (IP-пакеты). Этот набор может включать маршруты между некоторыми парами ИПС, наиболее и наименее загруженные направления и другие. В любом случае маршрут представляет собой многофазную СМО. Исключением считается маршрут, замыкающийся в пределах одного УК, но эта модель не представляет практического интереса.

Маршрут обмена IP-пакетами включает совокупность УК и соединяющих их трактов. Маршрут предназначен для организации связи между двумя ИПС (конфигурация "точка – точка"), либо между совокупностью ИПС (конфигурация "точка – множество точек"). Для оценки вероятностно-временных характеристик ниже будет рассматриваться конфигурация "точка – точка", так как именно она существенна для оценки показателей QoS в период ликвидации последствий ЧС.

Модель маршрута, включающего несколько УК между двумя ИПС, приведена на рисунке 4.5. Количество УК предполагается равным  $N$ . Время обмена IP-пакетами между смежными узлами коммутации под номерами  $i$  и  $i+1$  равно

$t_{i \leftrightarrow i+1}$ . Оно включает длительность распространения сигналов в среде передачи и время сериализации, определяемое отношением максимальной длины IP-пакета –  $l_{max}$  к скорости обмена информацией. Передаваемые IP-пакеты имеют разную длину, но нормы на *IPTD* и *IPDV* должны соблюдаться для любых значений длины IP-пакетов. По этой причине для оценки времени передачи используется величина  $l_{max}$ . Предполагается также, что формирование IP-пакета требует времени, которое составляет  $X$  единиц. Извлечение информации из IP-пакета требует  $Y$  единиц времени.

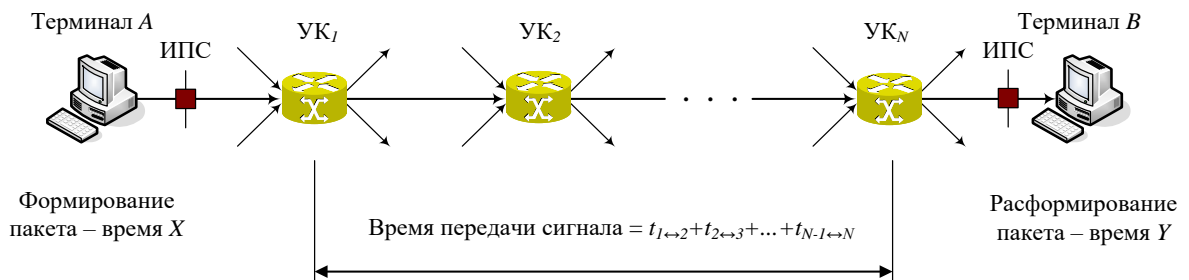


Рисунок 4.5 – Модель маршрута обмена IP-пакетами между двумя ИПС

Постоянная составляющая времени задержки IP-пакетов  $T_C$  может быть представлена суммой такого вида:

$$T_C = X + Y + \sum_{i=1}^{N-1} t_{i \leftrightarrow i+1}. \quad (4.1)$$

В силу аддитивности математического ожидания средняя задержка между ИПС *IPTD* равна сумме аналогичных значений во всех УК  $S_i^{(1)}$  ( $i = \overline{1, N}$ ) и постоянной составляющей  $T_C$ :

$$IPTD = T_C + \sum_{i=1}^N S_i^{(1)}. \quad (4.2)$$

Оценки величин вида  $S_i^{(1)}$  представлены в третьей главе диссертационной работы. На основании известных положений теории вероятностей [25] находится величина *IPLR* между ИПС по всем аналогичным значениям в каждом  $i$ -ом УК  $IPLR_i$ :

$$IPLR = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - IPLR_i). \quad (4.3)$$

Принципам оценки величины  $IPLR_i$  (в общем случае – расчету вероятности потери заявок в сложных СМО) посвящен ряд работ [29, 146, 182, 212]. Для исследуемой модели УК характерны условия:  $C_A(i) > 1$  и  $C_B(i) = 0$ . В этом случае для оценки  $IPLR_i$  уместно использовать соотношение (3.33), то есть:

$$IPLR_i \approx \pi_i. \quad (4.4)$$

Для расчета  $IPDV$  между ИПС сначала необходимо найти величину  $t_{\min}$ , которая представляет собой минимальное время передачи IP-пакета между ИПС. Для этого следует воспользоваться формулой (4.2), в которую вместо переменных  $S_i^{(1)}$  необходимо подставить значения минимально возможного времени обработки IP-пакета  $B_i^{(\min)}$ , полагая отсутствие очередей во всех УК в рассматриваемом маршруте между ИПС:

$$t_{\min} = T_C + \sum_{i=1}^N B_i^{(\min)}. \quad (4.5)$$

Значение  $B_i^{(\min)}$  равно  $B_i^{(1)}$  для постоянного времени обслуживания заявок. Во всех остальных случаях  $B_i^{(\min)}$  можно рассматривать как левую границу распределения  $B(t)$ . В частности, для гипотезы об экспоненциальном законе распределения времени обслуживания заявок  $B_i^{(\min)} \equiv 0$ . Для вычисления  $IPDV$ , согласно [236], надо найти разницу между квантилем  $t_{0,999}$  и  $t_{\min}$ :

$$IPDV = t_{0,999} - \left[ T_C + \sum_{i=1}^N B_i^{(\min)} \right]. \quad (4.6)$$

Алгоритм вычисления квантиля  $t_{0,999}$  приведен в [236]. В работе [185] показано, что рекомендуемый в [236] метод позволяет оценить квантиль  $t_{0,999}$  с минимальной погрешностью. Это значит, что уточнять метод, предложенный МСЭ-Т, нет необходимости. Соотношения (4.1) – (4.6) позволяют рассчитать все нормируемые показатели для NGN, но сначала необходимо оценить коэффициенты вариации  $C_A(i)$ . Метод решения этой задачи изложен в разделе 4.4. В следующем раз-

деле рассматривается частный случай функционирования предложенной модели маршрута между ИПС. Он заключается в том, что состояние перегрузки наблюдается только для одного УК в составе NGN. Такой случай типичен именно в условиях ЧС.

### 4.3 Анализ поведения NGN при перегрузке одного узла коммутации

При возникновении ЧС нередко наблюдаются ситуации, когда в состояние перегрузки входит только один из УК. Типичным примером такого состояния системы электросвязи можно считать отказ одного или нескольких элементов NGN. Тогда в некоторых маршрутах обмена IP-пакетами можно найти некое "узкое место" (в англоязычной технической литературе – *bottleneck*), из-за которого могут происходить нарушения штатного режима работы сети. Характеристики обслуживания трафика в соответствующем элементе NGN будут определять параметры времени задержки IP-пакетов, нормированные в качестве показателей QoS (в частности, *IPTD* и *IPDV*). В подобных случаях рекомендованный в [236] метод приводит к заметным ошибкам в оценке квантиля  $t_{0,999}$ .

На рисунке 4.6 показана структура сети, состоящей из семи УК, каждый из которых представляет собой однолинейную СМО. Рассматривается процесс обмена IP-пакетами между двумя ИПС. Допустим, что вследствие возникновения ЧС стал невозможен обмен заявками между СМО1 и СМО7. Очевидно, что заметно возрастет нагрузка на СМО2, так как в нее будут поступать все заявки из СМО1.

Маршрут обмена заявками между СМО1 и СМО4 показан пунктирными линиями. Объем трафика между смежными системами  $i$  и  $j$  обозначен как  $Y_{ij}$ . Для выбранной модели  $j=i+1$ . Объем трафика в  $i$ -й СМО обозначен как  $Y_i$ . Среди всех УК рассматриваемого маршрута можно найти  $k$ -й узел, для которого

будет справедливо неравенство  $Y_k > Y_i$  ( $i = \overline{1, N}, i \neq k$ ). Для исследуемого маршрута  $k = 2$ .

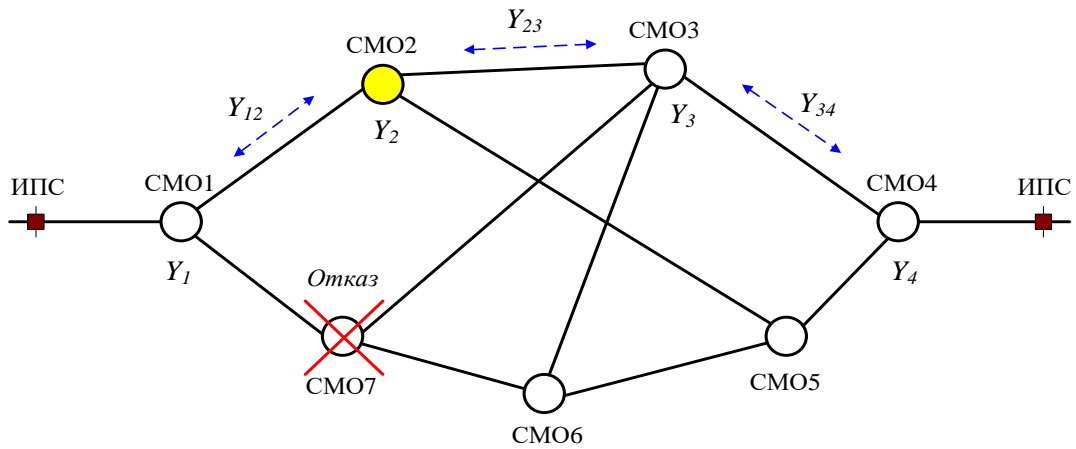


Рисунок 4.6 – Структура сети с семью узлами коммутации

Предложенная модель сети позволяет проанализировать три основных показателя, нормированных для NGN:  $IPTD$ ,  $IPDV$  и  $IPLR$ . Причем для расчета  $IPLR$  и  $IPTD$  менять приведенные выше выражения не имеет смысла, а для вычисления величины  $IPDV$  можно получить более точную оценку. Она основана на методе, предложенном в [253]. Его суть состоит в том, что характер ФР времени задержки заявок между ИПС  $S_{UNI}(t)$  определяется, в основном, распределением  $S_k(t)$ . Влияние задержки заявок в остальных фазах, количество которых равно  $(N-1)$ , учитывается величиной  $d$ :

$$d = \sum_{\{j\}} S_j^{(1)}. \quad (4.7)$$

Множество  $\{J\}$  образуется удалением  $k$ -го элемента из множества  $\{I\}$ , которое включает номера всех СМО в составе маршрута. Тогда для  $t > d$  можно использовать следующее приближение [253]:

$$S_{UNI}(t) \approx S_k(t-d). \quad (4.8)$$

Для определения области использования соотношения (4.8) рассмотрим простейшую модель – двухфазную СМО, каждая из которых представляет собой систему  $M/M/1/\infty/f_0$ . Пусть для обеих систем известны величины интенсивности и обслуживания  $(\mu_1, \mu_2)$ , и входящего потока заявок  $(\lambda_1, \lambda_2)$ . Преобразование

Лапласа для ФР времени задержки заявок в двухфазной СМО  $\xi(s)$  определяется формулой [47, 70]:

$$\xi(s) = \frac{(\mu_1 - \lambda_1)(\mu_2 - \lambda_2)}{s[s + (\mu_1 - \lambda_1)][s + (\mu_2 - \lambda_2)]}. \quad (4.9)$$

Без ущерба для последующего анализа можно ввести два допущения. Во-первых, величины интенсивности обслуживания идентичны. Тогда нижний индекс при параметре  $\mu$  можно опустить. Во-вторых, следует вычислить параметры загрузки, определяемые отношениями  $\lambda_1 / \mu$  и  $\lambda_2 / \mu$ . Пусть загрузка одной из фаз равна  $\rho$ , а второй – в  $l$  раз больше, то есть  $l\rho$ . Очевидно, что  $l > 1$ . Выполняя обратное преобразование [47], после ряда операций получаем оригинал от выражения (4.9) – ФР времени задержки заявок для двухфазной модели  $S(t)$ :

$$S(t) = 1 - \frac{(1 - \rho)e^{-(1-l\rho)\mu t} - (1 - l\rho)e^{-(1-\rho)\mu t}}{(l - 1)\rho}. \quad (4.10)$$

В статье [253] для маршрута, состоящего из  $N$  СМО, предлагается использование приближения  $F_N(t)$ . Для рассматриваемой модели  $N = 2$ . Функция  $F_2(t)$  может быть представлена в таком виде:

$$F_2(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t \leq x = \frac{1}{\mu(1-\rho)} \\ 1 - e^{-(1-l\rho)\mu(t-x)}, & \text{если } t > x \end{cases}. \quad (4.11)$$

Величина  $x$  равна математическому ожиданию времени задержки заявок на наименее нагруженной фазе. Для получения верхней и нижней границы исследуемого распределения уместно ввести два параметра, учитывающие дисперсию времени задержки заявок  $\sigma^2$  для наименее нагруженной СМО:  $x - \sigma$  и  $x + \sigma$ . При использовании смещения  $x - \sigma$  получается нижняя граница ФР времени задержки заявок  $F_2^L(t)$ . Для получения верхней границы этого же распределения  $F_2^U(t)$  следует использовать сумму  $x + \sigma$ . Верхние индексы выбраны как первые буквы слов "нижний" и "верхний" на английском языке: ( $L$  – lower) и ( $U$  – upper). Для маршрута из  $N$  фаз в рассматриваемых функциях следует заменить нижний индекс "2" буквой " $N$ ".

Для выбранной модели нижняя граница определяется ФР времени задержки заявок на наиболее загруженной фазе, так как  $x - \sigma = 0$ . Это значит, что задержка заявок на наименее нагруженной фазе просто не учитывается:

$$F_2^L(t) = 1 - e^{-(1-l\rho)\mu t}. \quad (4.12)$$

Верхняя граница ФР времени задержки заявок для рассматриваемой модели с учетом равенства  $x = \sigma$  представима в следующей редакции:

$$F_2^U(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t \leq 2x \\ 1 - e^{-(1-l\rho)\mu(t-2x)}, & \text{если } t > 2x \end{cases}. \quad (4.13)$$

Из формул (4.12) и (4.13) определяются квантили  $t_p^L$  и  $t_p^U$ . Следует помнить, что квантиль  $t_p^U$  должен рассчитываться для области  $t > 2d$ :

$$t_p^L = \frac{-\ln[1 - F_2^L(t)]}{\mu(1-l\rho)}, \quad t_p^U = \frac{-\ln[1 - F_2^U(t)]}{\mu(1-l\rho)} + 2d. \quad (4.14)$$

Возможность использования трех предлагаемых приближений  $F_2(t)$ ,  $F_2^L(t)$  и  $F_2^U(t)$  определяется величинами возникающих относительных ошибок  $\delta_2(t)$ ,  $\delta_2^L(t)$  и  $\delta_2^U(t)$  соответственно. Исследование ошибок следует проводить для дополнительной ФР  $S(t)$ , определяемой как  $1 - S(t)$ . Это утверждение основано на том, что с ростом  $t$  любая (даже самая неудачная) аппроксимация  $S(t)$  монотонно стремится к единице, а возникающая ошибка приближается к нулю.

Вычисления функции  $S(t)$  и ее приближений, полученных из выражений (4.11) – (4.13), позволяют оценить относительные ошибки  $\delta_2(t)$ ,  $\delta_2^L(t)$  и  $\delta_2^U(t)$ . На рисунках 4.7 и 4.8 показаны функции  $S(t)$  и две ее аппроксимации для  $l = 2$  и  $l = 3$  соответственно. По оси абсцисс отложено время, нормированное к математическому ожиданию длительности обслуживания заявок  $B^{(1)}$ , которая обратно пропорциональна интенсивности обслуживания  $\mu$ .



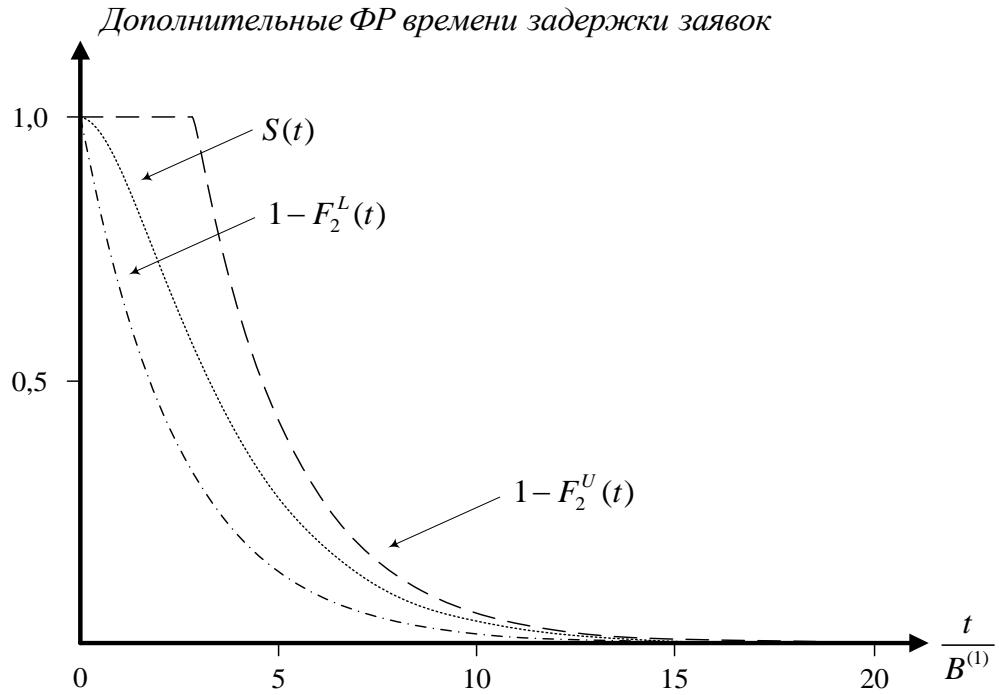


Рисунок 4.7 – Функция  $S(t)$  и две ее аппроксимации для  $l = 2$

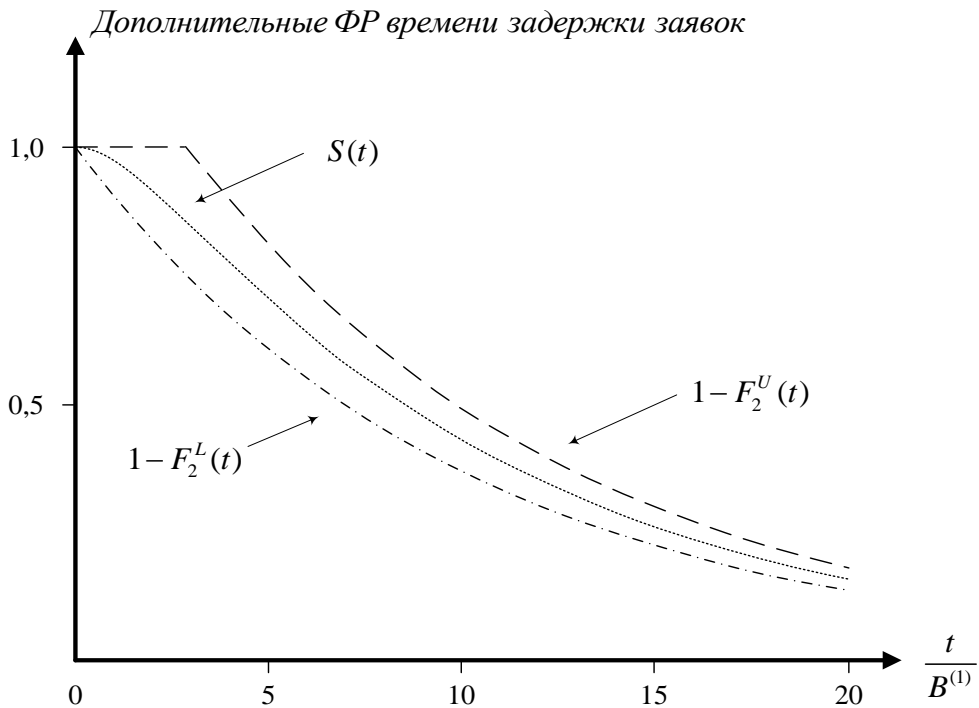


Рисунок 4.8 – Функция  $S(t)$  и две ее аппроксимации для  $l = 3$

На рисунках 4.9 и 4.10 приведены зависимости трех относительных ошибок  $\delta_2(t)$ ,  $\delta_2^L(t)$  и  $\delta_2^U(t)$ , полученных для  $l = 2$  и  $l = 3$  соответственно. При проведении

вычислений были использованы те же условия, что и для построения аппроксимаций функции  $S(t)$ .

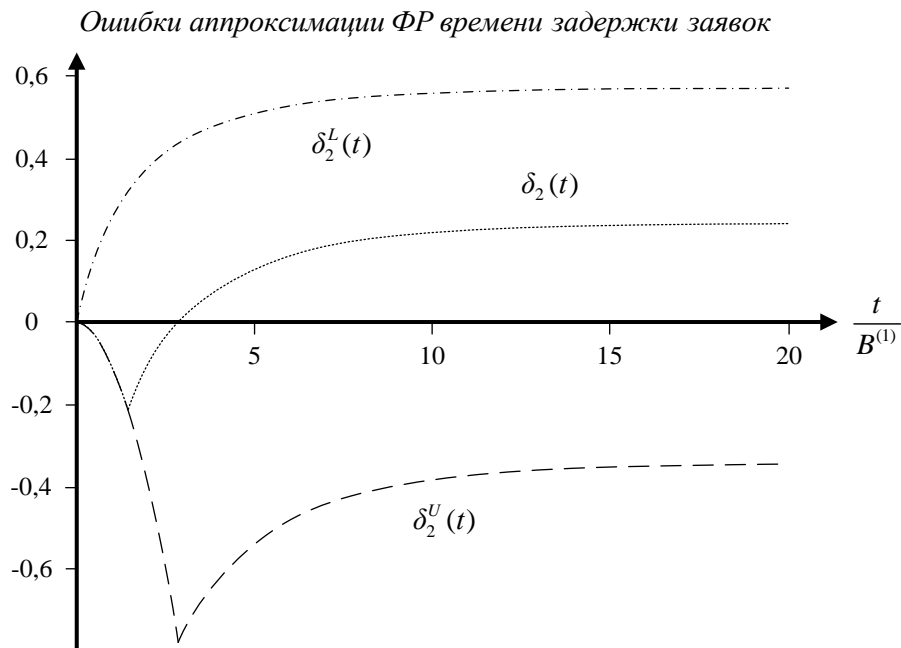


Рисунок 4.9 – Относительные ошибки аппроксимации функции  $S(t)$  для  $l = 2$

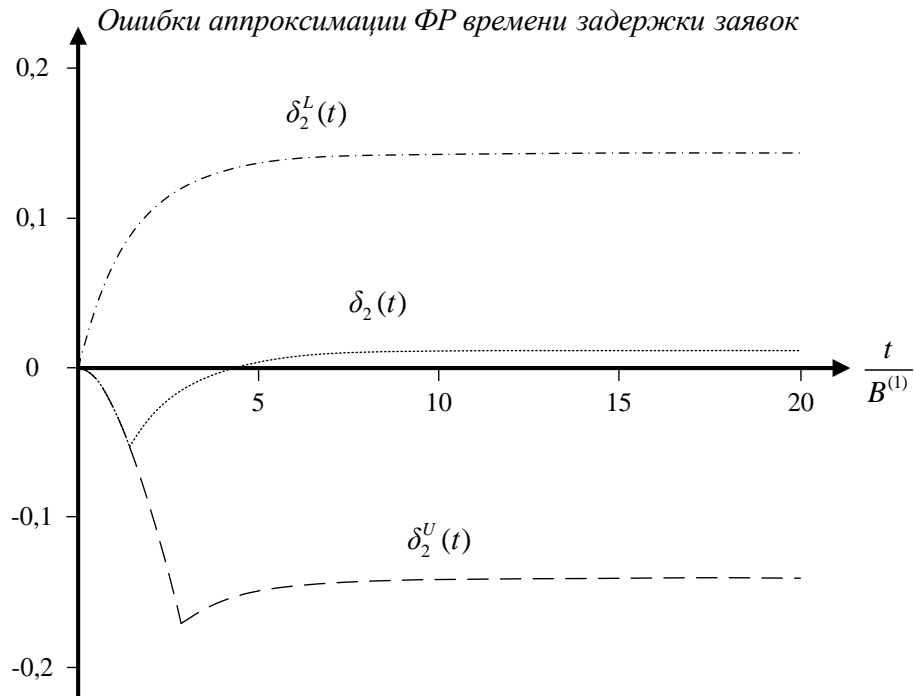


Рисунок 4.10 – Относительные ошибки аппроксимации функции  $S(t)$  для  $l = 3$

Графики, изображенные на рисунках 4.7 – 4.10, позволяют сделать ряд выводов, которые полезны для исследования более сложных моделей. Во-первых, с

ростом  $l$ , то есть при большом различии нагрузки в двух СМО, аппроксимация вида (4.11) позволяет с приемлемой ошибкой представить ФР времени задержки заявок для исследуемого маршрута. Во-вторых, предлагаемые приближения со смещениями вида  $x \pm \sigma$  обеспечивают верхнюю и нижнюю оценку для исследуемого распределения.

Оба вывода подтверждаются при увеличении количества фаз в составе маршрута и росте величины  $l$ . Очевидно, что подобные выводы остаются справедливыми для более сложных моделей, чем СМО вида  $M / M / 1 / \infty / f_0$ . Сначала они были проверены на двух системах вида  $G / M / 1 / \infty / f_0$  с разными законами распределения  $A(t)$  – эрланговским и гиперэкспоненциальным. Это позволило варьировать коэффициент вариации  $C_A$  в широких пределах (в частности, от 0,1 до 10). Гипотеза подтвердилась, что объясняется общностью выражения для функции  $S(t)$ , если ее преобразование Лапласа  $\xi(s)$  может быть представлено в виде отношения двух полиномов:

$$\xi(s) = \frac{\varphi(s)}{s\psi(s)}. \quad (4.15)$$

Когда знаменатель имеет  $n$  некрратных корней, функция  $S(t)$  может быть получена в форме [44, 47]:

$$S(t) = \frac{\varphi(0)}{\psi(0)} + \sum_{i=1}^n \frac{\varphi(s_i)}{s_i \psi'(s_i)} \exp(s_i t). \quad (4.16)$$

Следует отметить, что первый член в выражении (4.16) всегда равен единице, а корни  $s_i$  отрицательны. Очевидно, что поведение функции  $S(t)$  при увеличении  $t$  определяется слагаемым с минимальным по модулю корнем  $s_i$ . Для моделей  $M / M / 1 / \infty / f_0$  и  $GI / M / 1 / \infty / f_0$  корни  $s_i$  находятся элементарно. Для более сложных моделей преобразование Лапласа функции  $S(t)$  может не существовать. По этой причине для оценки возможности применения предлагаемых аппроксимаций необходимо использовать имитационное моделирование.

Имитационная модель основана на решениях, предложенных в [102]. Она представляет собой многофазную СМО, отображающую маршрут обмена IP-

пакетами, который был показан на рисунке 4.5. Маршрут состоит из  $N$  фаз. Предположим, что величины загрузки для  $(N-1)$  СМО идентичны и находятся в пределах, типичных для проектных решений. Эта загрузка далее обозначена как  $\rho$ . Для одной из СМО в исследуемом маршруте загрузка равна  $l\rho$ . Предположим, что на вход первой СМО поступает поток заявок, для которого функция  $A(t)$  представима двухпараметрическим распределением Вейбулла. Необходимые для расчета величины определяются соотношениями (3.18) и (3.19).

Исследования имитационной модели [102] проводились для трех значений коэффициента вариации  $C_A$ : 2, 5 и 10. Длительность обслуживания заявок во всех СМО предполагалась постоянной. Величина  $l$  выбиралась так, чтобы загрузка увеличивалась вдвое и более, но не превышала для наиболее нагруженной СМО уровня 0,95.

Результаты имитационного моделирования позволили сделать ряд важных выводов. Во-первых, для сложных многофазных СМО, адекватно отображающих реальные процессы обмена IP-пакетами в NGN, поведение исследуемых функций, которые показаны на рисунках 4.7 и 4.8 для простейших моделей, остается неизменным. Во-вторых, относительная ошибка в расчете квантиля  $t_{0,999}$  немного возрастает, но остается вполне приемлемой для решения практических задач. В частности, при  $l \geq 3$  относительная ошибка для исследованных распределений  $A(t)$  не превышает 20% и практически не зависит от коэффициента вариации  $C_A$ . В-третьих, для выбранных параметров модели предлагаемые оценки можно трансформировать следующим образом:

$$F_N^L(t) \approx S_k(t-d), \quad F_N^U(t) \approx S_k(t-d-\sigma). \quad (4.17)$$

Это снижает величину ошибки при расчете квантиля  $t_{0,999}$ , но использование соотношений (4.17) правомерно только для рассматриваемой модели с учетом присущих ей свойств. Две оценки сохраняют универсальный характер для любых параметров модели:

$$F_N^L(t) \approx S_k(t-d+\sigma), \quad F_N^U(t) \approx S_k(t-d-\sigma). \quad (4.18)$$

Таким образом, для оценки вероятностно-временных характеристик в многофазной СМО с загрузкой одной системы, которая заметно превышает среднее значение загрузки в остальных элементах маршрута, можно использовать метод, предложенный в [253]. Но его следует дополнить оценками верхней и нижней границ, используя соотношения (4.18).

#### 4.4 Методика оценки коэффициентов вариации $C_A(i)$

Рассмотрим ситуацию, когда на вход транзитного УК поступает  $m$  потоков IP-пакетов, количество которых определяется структурой сети. Каждый  $k - \text{й}$  поток IP-пакетов характеризуется функцией распределения  $A_k(t)$ ,  $k = \overline{1, m}$ . Она определяет длительность интервалов между моментами поступления IP-пакетов в  $k - \text{й}$  УК. Транзитный УК рассматривается как однолинейная СМО, на вход которой поступает поток заявок, описываемый функцией распределения  $A(t)$ . Вид этого распределения определяется функциями  $A_k(t)$ . Очевидно, что распределение  $A(t)$  зависит как от характера функций  $A_k(t)$ , так и их количества – величины  $m$ . Функции  $A_k(t)$ , в свою очередь, определяются характером выходящих потоков из предшествующих СМО [213, 241] – УК в составе сети следующего поколения. Результаты исследования этих потоков изложены в последнем разделе 3.6 третьей главы диссертационной работы и представлены в статье [109].

На рисунке 4.11 приведена модель, состоящая из двух СМО под номерами  $i$  и  $j$ . На вход  $i - \text{й}$  СМО поступает поток заявок, для которого известны, по крайней мере, два параметра: интенсивность  $\lambda(i)$  и коэффициент вариации длительности интервалов между моментами поступления заявок  $C_A(i)$ . Величина  $\lambda(i)$  обратно пропорциональна среднему значению длительности интервалов между моментами поступления заявок в  $i - \text{ю}$  СМО  $A^{(1)}(i)$ .

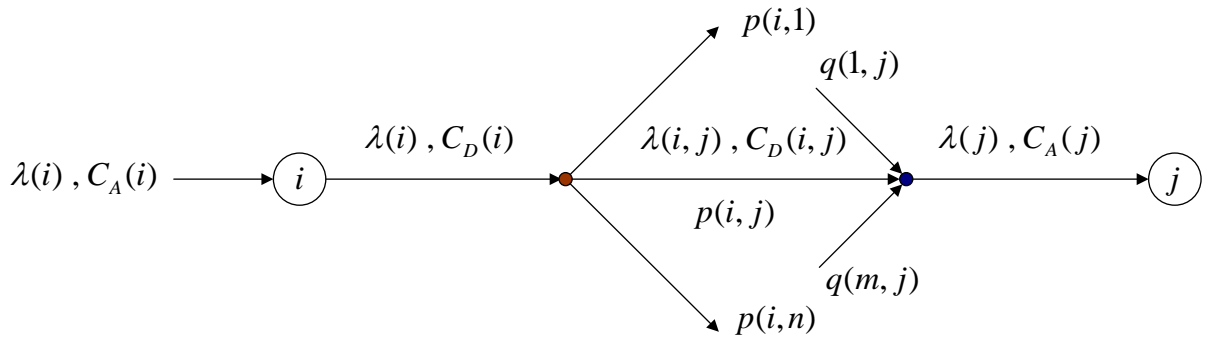


Рисунок 4.11 – Исследуемая модель из двух систем массового обслуживания

В результате обслуживания заявок на выходе  $i$ -й СМО формируется поток, интенсивность которого при небольших вероятностях потери заявок, что, на самом деле, типично для сети следующего поколения, может полагаться равной  $\lambda(i)$ . Для постоянного времени обслуживания заявок, что характерно для сети следующего поколения, в разделе 3.6 получены выражения для оценки коэффициента вариации длительности интервалов между моментами ухода заявок из  $i$ -й СМО  $C_D(i)$ .

Далее заявки распределяются между другими СМО, количество которых равно  $n$ , с вероятностями  $p(i, j)$ , где  $j = \overline{1, n}$ . Первая задача заключается в оценке двух параметров. Во-первых, следует определить  $n$  величин интенсивности потоков  $\lambda(i, j)$ . Во-вторых, необходимо оценить соответствующие коэффициенты вариации  $C_D(i, j)$ .

На вход  $j$ -й СМО поступает  $m$  потоков заявок. В общем случае  $m \neq n$ . Вероятность направления  $l$ -го потока, где  $l = \overline{1, m}$ , в  $j$ -ю СМО обозначена как  $q(l, j)$ . На входе  $j$ -й СМО происходит суммирование  $m$  потоков. В результате формируется поток заявок с интенсивностью  $\lambda(j)$  и коэффициентом вариации длительности интервалов между моментами поступления заявок  $C_A(j)$ . Вторая задача заключается в определении этих двух параметров.

Для СМО с постоянным временем обслуживания заявок, что справедливо для моделей, которые используются для исследования УК в составе пакетной сети, в разделе 3.6 было получено приближенное соотношение (3.43), связывающее

величины коэффициентов вариации  $C_A(i)$  и  $C_D(i)$  с загрузкой системы  $\rho$ . На основании выражений, приведенных в [213], получены формулы для оценки величин  $\lambda(i, j)$  и  $C_D(i, j)$ :

$$\lambda(i, j) = p(i, j) \cdot \lambda(i), \quad C_D^2(i, j) \approx p(i, j) \cdot C_A^2(i) \cdot (1 - \rho^2) + [1 - p(i, j)]. \quad (4.19)$$

В период действия ЧС нагрузка УК часто близка к единице. Тогда на выходе СМО с постоянным временем обслуживания заявок, служащей моделью УК, формируется поток, близкий к регулярному. Величина  $C_D(i, j)$  будет определяться вторым слагаемым из формулы для оценки данного коэффициента:

$$C_D(i, j) \approx \sqrt{1 - p(i, j)}. \quad (4.20)$$

Справедливо неравенство следующего вида:  $C_D(i, j) \leq 1$ . Это значит, что гипотеза о пуассоновском потоке позволит получить приближения для вероятностно-временных характеристик СМО на следующей фазе обслуживания заявок.

Преобразование Лапласа-Стилтьеса для функции распределения длительности интервалов между заявками, которые распределяются между СМО под номерами  $i$  и  $j$ , обозначаемое далее как  $D_{ij}(s)$ , определяется двумя аргументами. Оно зависит от вероятности направления заявок в  $j$ -ю СМО  $p(i, j)$  и преобразования Лапласа-Стилтьеса функции распределения длительности интервалов между заявками, покидающими  $i$ -ю СМО  $D_i(s)$  [241]:

$$D_{ij}(s) = \frac{p_{ij} \cdot D_i(s)}{1 - (1 - p_{ij}) \cdot D_i(s)}. \quad (4.21)$$

Получение оригинала – функции  $D_{ij}(t)$  – представляет собой очень сложную задачу. Хорошее приближение можно получить за счет представления функции  $D_{ij}(t)$  в виде ряда Эджворта [83]. С этой целью, согласно правилу нахождения моментов случайной величины по изображению функции распределения [47], необходимо найти производные от выражения (4.21). Обычно достаточно знать четыре производные, позволяющие определить моменты  $n$ -го порядка  $D_{ij}^{(n)}$ .

На этом заканчивается решение первой задачи, в которой анализируются процессы на выходе  $i$ -й СМО. Вторая задача связана с изучением аналогичных процессов на входе  $j$ -й СМО.

Интенсивность потока, поступающего на вход  $j$ -й СМО, определяется как:

$$\lambda_j = \sum_{l=1}^m q(l, j) \cdot \lambda(l, j). \quad (4.22)$$

Поиск коэффициента вариации суммарного потока заявок, поступающих на вход  $j$ -й СМО  $C_A(j)$ , представляет собой сложную задачу. Она может быть решена, например, за счет нахождения функции распределения суммарного потока заявок на входе  $j$ -й СМО  $A_j(t)$ . Получить эту функцию можно только для ограниченного набора распределений вида  $D_{ij}(t)$ . В [241] приведена формула для частного случая, когда находится распределение  $A(t)$  при объединении двух потоков с величинами интенсивности  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , заданных для распределений  $A_1(t)$  и  $A_2(t)$  соответственно:

$$A(t) = 1 - \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot \left[ (1 - A_1(t)) \cdot \int_t^{\infty} [1 - A_2(x)] dx + (1 - A_2(t)) \cdot \int_t^{\infty} [1 - A_1(x)] dx \right]. \quad (4.23)$$

При суммировании двух пуассоновских потоков заявок с величинами интенсивности  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  формируется пуассоновский поток с интенсивностью равной  $\lambda_1 + \lambda_2$ . Объединение потока с интенсивностью  $\lambda_1 + \lambda_2$  с потоком, интенсивность которого равна  $\lambda_3$ , снова формирует пуассоновский поток заявок с интенсивностью  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$ . Продолжая аналогичные действия можно показать, что суммирование  $m$  пуассоновских потоков приводит к появлению пуассоновского потока с интенсивностью, равной  $\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_m$ .

Для получения функции  $A_j(t)$  при суммировании  $m$  потоков вычисление по приведенному выше соотношению необходимо повторить  $m - 1$  раз. Это не поз-



воляет рассматривать данную процедуру в качестве метода, пригодного для анализа поведения УК в составе сети следующего поколения (за исключением случая, когда гипотеза о пуассоновских потоках остается приемлемой). Тем не менее, последнее соотношение полезно для проверки оценок, которые основаны на приближенных формулах или результатах моделирования. Кроме того, оно позволяет исследовать объединение регулярных потоков.

Рассмотрим СМО, на вход которой поступают два регулярных потока с одинаковыми интенсивностями  $\lambda$ . В этом случае распределение  $A(t)$ , среднее значение длительности интервалов между моментами поступления заявок  $A^{(1)}$  и коэффициент вариации  $C_A$  определяются следующими формулами:

$$A(t) = \begin{cases} 1 - \lambda(\lambda^{-1} - t), & \text{при } t < \lambda^{-1} \\ 1, & \text{при } t \geq \lambda^{-1} \end{cases}, \quad A^{(1)} = \frac{1}{2\lambda}, \quad C_A = \frac{1}{\sqrt{3}}. \quad (4.24)$$

Эти выражения свидетельствуют, что распределение  $A(t)$  становится равномерным на отрезке  $(0, \lambda^{-1})$ . Формулы при объединении большого числа потоков становятся громоздкими и в данной работе не приводятся.

Для получения оценок коэффициента вариации  $C_A(j)$  можно воспользоваться методикой, которая предложена в [241]. Она основана на аппроксимации входящего потока распределением  $A_j(t)$ , вид которого зависит от величины  $C_A(j)$ . Когда есть основания считать, что искомая величина меньше единицы, то распределение  $A_j(t)$  – при суммировании двух потоков – предлагается оценивать экспоненциальным распределением с постоянным смещением. Для потоков с коэффициентом вариации  $C_A(j)$  более единицы предлагается аппроксимация функции  $A_j(t)$  гиперэкспоненциальным распределением.

Более простая аппроксимация коэффициента вариации  $C_A(j)$  содержится в [213]. Она основана на приближении:

$$C_A^2(j) \approx 1 + \sum_{l=1}^m [q(l, j)]^2 \cdot [C_D^2(l, j) - 1]. \quad (4.25)$$

Формула (4.25) дает точные значения коэффициента вариации  $C_A(j)$ , по крайней мере, для двух случаев: поток заявок, покидающих предшествующую фазу, является пуассоновским или регулярным. Возможность применения аппроксимаций, предложенных в [241], и соотношения (4.25) определяется ошибкой расчета величины  $C_A(j)$ . Для исследования этой ошибки используется имитационная модель, предложенная в [102] и апробированная при анализе поведения ряда СМО, которые адекватно отражают процессы функционирования УК в сети следующего поколения.

Для характеристики потоков заявок, суммируемых на входе  $j$ -й СМО, было выбрано несколько распределений, позволяющих варьировать в широких диапазонах величину коэффициента вариации  $C_D(i, j)$ . Основное внимание при проведении моделирования уделено трем распределениям:

- регулярное, для которого коэффициент вариации  $C_D(i, j)$  равен нулю;
- Эрланга  $k$ -го порядка (при  $1 \leq k < \infty$ ), обеспечивающее получение коэффициента вариации  $C_D(i, j)$  в диапазоне от нуля до единицы;
- Вейбулла, которое позволяет исследовать случайную величину с коэффициентом вариации  $C_D(i, j)$ , превышающем единицу.

Для регулярных потоков соотношение (4.25) упрощается, так как все величины  $C_D(l, j)$  равны нулю:

$$C_A^2(j) \approx 1 - \sum_{l=1}^m q^2(l, j). \quad (4.26)$$

Важной мерой становится ошибка, которая возникает при объединении двух потоков с одинаковой интенсивностью. В этом случае коэффициент  $C_A(j)$  равен 0,5; аналогичная величина, вычисленная из формулы (4.24), составляет примерно 0,577. Различие между этими оценками снижается по мере увеличения количества объединяемых потоков, то есть при  $m \geq 3$ . Если все величины  $q(l, j)$  одинаковы (распределение заявок по другим СМО осуществляется с равной веро-

ятностью), то  $C_A(j) \approx \sqrt{1 - m^{-1}}$ . Это значит, что при  $m \rightarrow \infty$  коэффициент вариации входящего потока заявок близок к единице.

Результаты моделирования представлены в графической форме для трех распределений объединяемых потоков заявок, часто встречающихся на практике. На рисунке 4.12 приведены типичные зависимости коэффициента вариации  $C_A(j)$  от количества потоков  $N$ , объединяемых на входе транзитного УК. Величина  $N$  меняется от двух до десяти. Этот диапазон соответствует значениям числа объединяемых потоков, чаще всего встречающимся в эксплуатируемых сетях электросвязи.

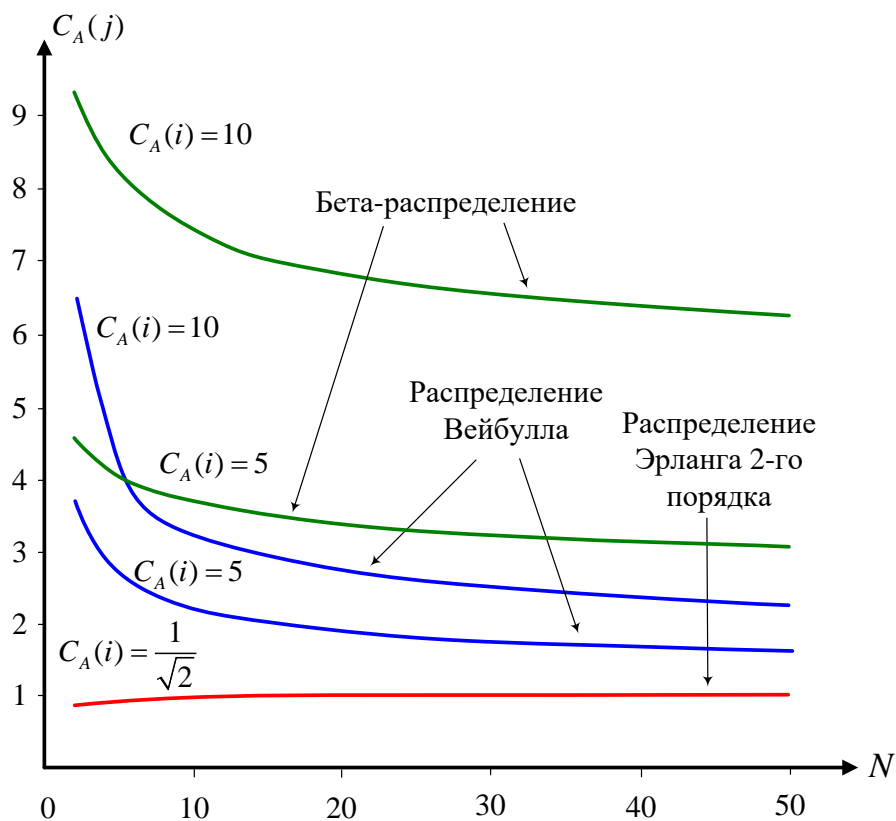


Рисунок 4.12 – Зависимость  $C_A(j)$  от количества объединяемых потоков

Приведенные зависимости позволяют сделать ряд важных выводов, среди которых следует выделить три положения. Они подтверждаются и другими результатами моделирования.

Во-первых, объединение большого числа потоков IP-пакетов на входе транзитного узла коммутации приводит к формированию потока, близкого к пуассо-

новскому. Эта тенденция не зависит от вида распределений, характерных для суммируемых потоков.

Во-вторых, близость к пуассоновскому потоку зависит, в основном, от характера распределений  $D_{ij}(t)$ , которые описывают складываемые потоки. В частности, при объединении пяти и более входящих потоков, представимых распределением Эрланга  $k - go$  порядка, суммарный поток очень близок к пуассоновскому. Данное утверждение справедливо также для регулярных потоков, которые можно рассматривать как распределение Эрланга при  $k \rightarrow \infty$ . Оно остается верным и для других распределений при условии, что соблюдается такое неравенство:  $C_D(l, j) \leq 1$ . Если объединяемые потоки описываются распределениями с так называемыми "тяжелыми хвостами", для которых коэффициент вариации  $C_D(l, j) > 1$ , то суммарный поток становится близок к пуассоновскому только при очень большом числе объединяемых потоков. Еще медленнее происходит сходимость к пуассоновскому потоку для распределений вида  $A_l(t)$ . Как правило, величина  $N$ , для которой можно говорить о получении результирующего пуассоновского потока, существенно превышает практически интересный диапазон изменения количества направлений для транзитного узла коммутации в сети связи следующего поколения. По этой причине гипотеза о пуассоновском потоке при объединении распределений вида  $A_u(t)$  и  $A_l(t)$  не может быть использована.

В-третьих, зависимости, приведенные на рисунке 4.12, не меняют своего характера при идентичных величинах интенсивности объединяемых потоков и при различии этих значений менее чем на порядок. Величины интенсивности потока заявок (IP-пакетов или вызовов), которые суммируются на входе транзитного узла коммутации, не одинаковы, но их отношение, судя по результатам измерений, обычно лежит в диапазоне от 1,5 до 5,0.

Величина относительной ошибки  $\delta_A(j)$  при оценке коэффициента вариации  $C_A(j)$  по формуле (4.25) не превышает 10%, что вполне приемлемо для решения большинства практических задач по планированию сети. Этот вывод справедлив

для всех проверенных распределений в диапазоне изменения коэффициента вариации  $0 \leq C_D(l, j) \leq 10$ .

В результате проведенных исследований получены соотношения, позволяющие оценить два параметра потока IP-пакетов на входе транзитного узла коммутации, который входит в состав сети связи следующего поколения. Первый параметр – интенсивность входящего потока IP-пакетов. Вторым параметром является коэффициент вариации длительности интервалов между моментами поступления IP-пакетов. Определение этих двух величин необходимо для оценки основных характеристик качества обслуживания трафика в сети связи следующего поколения.

#### **4.5 Нормы на показатели качества обслуживания мультисервисного трафика при ЧС**

Функциональные возможности NGN ориентированы на обслуживание мультисервисного трафика. Некоторые виды трафика значительно различаются между собой как по ряду атрибутов, так и нормами на качественные показатели. По этой причине для NGN (и для других пакетных сетей) обычно вводятся классы обслуживания, характеризующие различия в используемых нормах.

В документах Европейского института по стандартам в области связи ETSI упоминаются четыре класса обслуживания, позволяющие интуитивно определить ожидаемый уровень качества поддерживаемых услуг: "платина", "золото", "серебро" и "бронза". МСЭ-Т в рекомендации Y.1541 [236] выделил шесть классов качества обслуживания (QoS), а также два класса обслуживания, которые пока не являются обязательными. В таблице 4.1 приведены значения трех обязательных показателей QoS, существенных для вопросов, рассматриваемых в диссертационной работе:

- *IPTD* – средняя задержка IP-пакетов,

- *IPDV* – вариация задержки IP-пакетов,
- *IPLR* – доля потерянных IP-пакетов.

Таблица 4.1 – Показатели QoS для штатных условий эксплуатации сети

Класс QoS	<i>IPTD</i> , мс	<i>IPDV</i> , мс	<i>IPLR</i>
0	100	50	0,001
1	400	50	0,001
2	100	<i>U</i>	0,001
3	400	<i>U</i>	0,001
4	1000	<i>U</i>	0,001
5	<i>U</i>	<i>U</i>	<i>U</i>

Символ "*U*" – первая буква в слове "unspecified" (не оговоренный в тексте технических условий). Он показывает, что показатель для данного класса обслуживания не нормируется. В тексте рекомендации Y.1541 [236] аналогичная таблица снабжена большим количеством комментариев. С учетом вопросов, которым посвящена данная диссертация, уместно привести два следующих пояснения:

I. Величина *IPDV* определяется разницей между верхней границей, в качестве которой рекомендуется 99,9% квантиль ФР длительности задержки IP-пакетов между ИПС, и нижней границей задержки. Эти соображения МСЭ-Т считает предварительными и требующими дополнительного изучения.

II. Требования для нулевого и первого классов базируются на исследованиях, которые свидетельствуют о том, что высококачественные голосовые приложения эффективны при значениях *IPLR* менее  $10^{-3}$ .

Перечисленные показатели QoS относятся к процессу обмена информацией между ИПС в виде IP-пакетов. Процессу обмена информацией часто (в телефонной связи – всегда) предшествует этап установления соединения между двумя или более ИПС. В качестве показателей QoS используются вероятность отказа в об-

служивании (потери вызова)  $p_0$  и параметры времени задержки установления соединения (нормируется среднее значение  $t^{(1)}$  и квантиль  $t_{0,95}$ ).

Для телефонной связи при возникновении ЧС особо важной представляется норма  $p_0$ . Для ТфОП эта вероятность при выходе к ДДС была определена на уровне 0,001 [133]. Это на порядок жестче, чем допустимые величины отказа в обслуживании при местной и междугородной телефонной связи. По всей видимости, норму  $p_0 = 0,001$  следует сохранить при переходе к NGN.

Нормы, приведенные в таблице 4.1, используются при разработке проектов построения NGN для штатных условий эксплуатации телекоммуникационной системы. При возникновении некоторых видов ЧС не меняется структура NGN и не возникают перегрузки в основных компонентах сети. Тогда процесс эксплуатации NGN может базироваться на соблюдении нормированных показателей QoS.

Некоторые виды масштабных ЧС приводят и к изменению структуры сети из-за отказов ее элементов, и к резкому росту трафика. Тогда соблюдение показателей QoS, приведенных в таблице 4.1, не представляется возможным. В подобных случаях необходимо пересмотреть действующие принципы нормирования показателей QoS на основании трех утверждений.

Первое утверждение основано на том, что нулевой (лучший) класс обслуживания предоставляется IP-пакетам, связанным с информационным обменом, служащим для ликвидации последствий ЧС, обеспечения оперативной работы органов государственного управления, доступа абонентов к операторам ЕДДС и ДДС. Это значит, что класс обслуживания не связан с видом информации.

Второе утверждение базируется на упомянутом выше приемлемом уровне обслуживания. Под этим термином понимается замена некоторых численных значений нормированных параметров более "мягкими" показателями. В частности, некоторые публикации, которые можно найти на сайтах Интернет, свидетельствуют, что величина *IPLR*, в десять (и более) раз превышающая порог 0,001, приемлема для обычного телефонного диалога. Повышение примерно на 50%

значений показателей *IPTD* и *IPDV* также не вызывает ощущений дискомфорта, исключая малочисленную группу особо придирчивых к качеству связи абонентов.

Третье утверждение связано с необходимостью ограничения трафика, который порождается некоторыми видами услуг. Например, логично прекратить до восстановления всех отказавших элементов сети обслуживание трафика, генерируемого развлекательными услугами. Конечно, такое решение должно приниматься на основании нормативных правовых актов и подкрепляться информацией, направляемой пользователям NGN [107].

В качестве первого варианта модификации нормируемых показателей QoS для периода от возникновения ЧС до ликвидации ее последствий предлагается использовать два класса обслуживания:

- трафик, важный для ликвидации последствий ЧС (в его состав входят служебные сообщения, необходимые для работы всех видов оборудования NGN) и трафик речи всех абонентов ССОП;
- остальные виды трафика.

Численные значения показателей приведены в таблице 4.2. Названия классов обслуживания указаны римскими цифрами. Выбор предложенных показателей основан на исследованиях приемлемых значений QoS [16, 219, 221, 246, 256], а также на результатах измерений в эксплуатируемых фрагментах NGN.

Таблица 4.2 – Показатели QoS в период действия ЧС

Класс QoS	<i>IPTD</i> , мс	<i>IPDV</i> , мс	<i>IPLR</i>
I	150	50	0,01
II	1000	–	0,05

Окончательный выбор показателей, официально устанавливаемых на весь период действия ЧС, требует сбора статистических данных, их обобщения и, по всей видимости, проведения серьезной исследовательской работы. После проведения указанных работ показатели QoS на период действия ЧС должны быть закреплены на законодательном уровне.



Объем трафика, относящегося к классу обслуживания I, хорошо прогнозируется. Для класса обслуживания II такое утверждение нельзя считать корректным. Поэтому необходимо разработать метод управления этим трафиком. Результаты исследований аналогичных процессов, изложенные в первой главе диссертационной работы, показывают, что очень удачным решением может стать ограничение некоторых видов трафика.

Величины *IPTD*, *IPDV* и *IPLR*, приведенные в таблицах 4.1 и 4.2, заданы между ИПС. Нормирование этих показателей необходимо провести для фрагментов NGN, а в ряде случаев – для одного УК. Методологический подход к проведению декомпозиции показателей *IPTD*, *IPDV* и *IPLR* содержится в рекомендации МСЭ-Т Y.1542 [233]. При его адаптации к условиям функционирования NGN в период действия ЧС следует ввести два упрощения:

- Размеры территории, в границах которой ощущаются последствия ЧС, малы по сравнению с площадью, на которой функционирует телекоммуникационная система Российской Федерации. Это позволяет пренебречь временем распространения сигнала при проведении дальнейших вычислений.
- Время сериализации [72], равное отношению длины передаваемого пакета к скорости его передачи, для NGN (в отличие от других пакетных сетей) составляет десятки или единицы микросекунд. По этой причине величиной времени сериализации также можно пренебречь при декомпозиции показателей качества обслуживания мультисервисного трафика.

Модель, при помощи которой иллюстрируются принципы декомпозиции показателей QoS, приведена на рисунке 4.13. Она взята из рекомендации МСЭ-Т Y.1542 [233]. При официальном переводе этой рекомендации сокращение "UNI" (User-Network Interface) не было заменено российской аббревиатурой ИПС. На рисунке 4.13 это упущение исправлено.

Вне зависимости от количества разных сетей (с точки зрения их принадлежности тому или иному Оператору связи) суть модели заключается в том, что между двумя ИПС находится некоторое количество УК. Далее эта величина обо-

значается как  $N$ . Для всех трех показателей  $IPTD$ ,  $IPDV$  и  $IPLR$  можно ввести аналогичные величины для каждого  $i$ -го УК;  $i = \overline{1, N}$ . Такие показатели будут далее отличаться нижним индексом  $i$ .

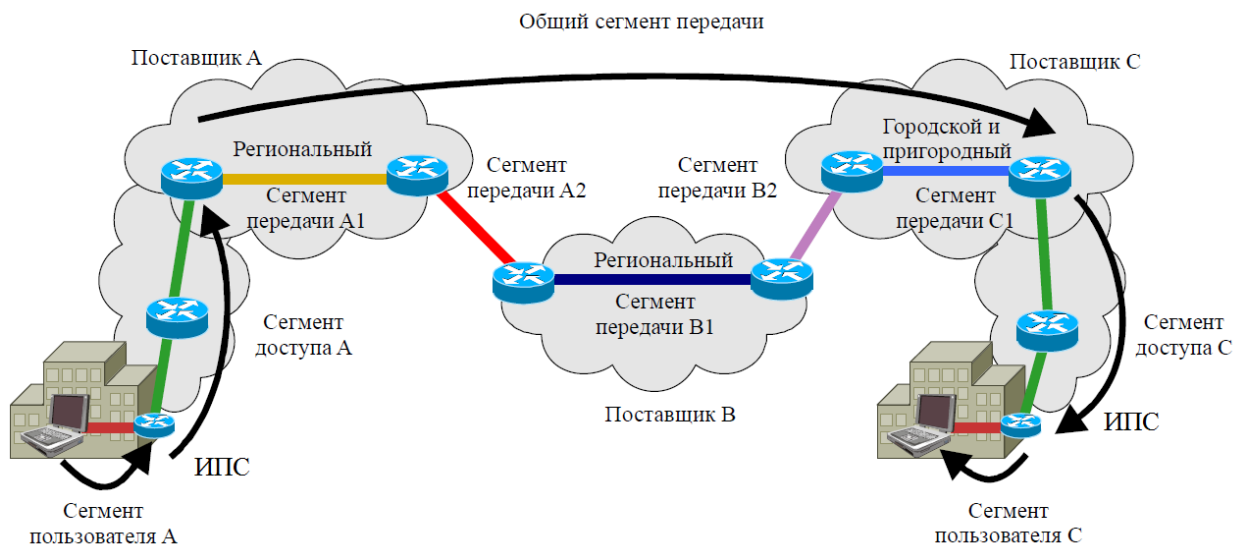


Рисунок 4.13 – Модель МСЭ-Т для декомпозиции показателей QoS

Используя правило аддитивности математического ожидания [25], можно записать соотношение:

$$IPTD = \sum_{i=1}^N IPTD_i. \quad (4.27)$$

Поставленная задача сводится к выбору соотношения между величинами  $IPTD_i$ . При возникновении ЧС правила установления таких соотношений на основе предложений из рекомендации МСЭ-Т Y.1542 не приемлемы из-за несоответствия текущих значений трафика  $Y_i(t)$  тем величинам, которые были выбраны при разработке проектных решений. Кроме того, в условиях ЧС возможны ситуации, когда величина  $N$  становится меньше, чем количество УК, которое должно функционировать согласно проектным решениям –  $N_{np}$ . Иными словами после ЧС справедливо такое неравенство:  $N \leq N_{np}$ .

Для выбора величин  $IPTD_i$  можно ввести коэффициенты пропорциональности  $\gamma_i$ , упрощающие решение задачи декомпозиции:

$$IPTD_i = \gamma_i \cdot \overline{IPTD}, \quad i = \overline{1, N}. \quad (4.28)$$

Для вычисления коэффициентов  $\gamma_i$  следует учитывать значения трафика  $Y_i(t)$ . Они будут меняться со временем. По этой причине коэффициенты  $\gamma_i$  должны периодически пересчитываться. Алгоритм декомпозиции показателей QoS в период действия ЧС приведен на рисунке 4.14. Он включает последовательность сравнительно простых операций.



Рисунок 4.14 – Алгоритм декомпозиции показателей QoS в период действия ЧС

Вычислены коэффициенты  $\gamma_i$  в процессе реализации рассматриваемого алгоритма:

$$\gamma_i = \frac{Y_i(t)}{\sum_{k=1}^N Y_k(t)}, \quad i = \overline{1, N}. \quad (4.29)$$

Выбор величины  $\tau$  определяется скоростью изменения величин  $Y_i(t)$ . Анализ аналогичных изменений в СДЭ [95] позволяет установить начальное значение  $\tau$  на уровне одной минуты. По мере накопления статистики по работе предложенного алгоритма этот порог можно менять, внося изменения в соответствующее программное обеспечение.

В монографии [187] показано, что величины вида  $IPDV_i$  связаны с общей нормой на показатель  $IPDV$  следующим неравенством:

$$IPDV < \sum_{i=1}^N IPDV_i. \quad (4.30)$$

Это позволяет использовать для оценки величин  $IPDV_i$  соотношение, подобное формуле (4.28):

$$IPDV_i \approx \gamma_i \cdot IPDV, \quad i = \overline{1, N}. \quad (4.31)$$

Различие между левой и правой частями неравенства (4.30) не столь существенно. Для моделей, близких в практике, оно составляет не более 20%. По этой причине оценка  $IPDV_i$  по формуле (4.31) вполне приемлема.

Показатель  $IPLR$  может быть вычислен по величинам вероятности потери IP-пакетов в каждом  $i$ -ом УК – формула (4.3). В явном виде, как это сделано для показателей  $IPTD_i$  и  $IPDV_i$ , получить выражение для оценки  $IPLR_i$  из соотношения (4.3) не удастся. С другой стороны, можно воспользоваться тем обстоятельством, что произведения вида  $IPLR_i \cdot IPLR_j$  не вносят заметный вклад в выражение (4.3). Это значит, что можно записать приближенное выражение для оценки  $IPLR$ :

$$IPLR \approx \sum_{i=1}^N IPLR_i. \quad (4.32)$$

В таблице 4.2 самым большим значением  $IPLR$  служит уровень 0,1. Именно для этого уровня вероятности потери IP-пакетов следует оценить точность вычислений за счет использования формулы (4.32). Пусть все величины  $IPLR_i$  равны между собой. Тогда величина  $IPLR_i$  определяется из соотношения (4.3) следующим образом:

$$IPLR_i = 1 - \sqrt[N]{1 - IPLR}. \quad (4.33)$$

Из выражения (4.32), при введенных выше допущениях, вычисляется приближенное значение  $IPLR_i$ :

$$IPLR_i \approx \frac{IPLR}{N}. \quad (4.34)$$

Вычисления  $IPLR_i$  по точной и приближенной формулам сведены в таблицу 4.3. В нижней строке этой таблицы приведены значения относительной ошибки в расчете  $IPLR_i$ .

Таблица 4.3 – Результаты оценки показателя  $IPLR_i$

Количество УК ( $N$ )	2	4	6	8	10
$IPLR_i$ , формула (4.33)	0,0513	0,0259	0,0174	0,0131	0,0105
$IPLR_i$ , формула (4.34)	0,0500	0,0250	0,0167	0,0125	0,0100
Относительная ошибка	2,63%	3,83%	4,06%	4,46%	4,58%

Очевидно, что относительная ошибка, обусловленная упрощением метода декомпозиции для показателя  $IPLR$ , остается в допустимых пределах для инженерных расчетов. Следовательно, метод декомпозиции, основанный на применении соотношения (4.34) вполне приемлем для практических целей.

При анализе всех трех показателей использовано предположение, что исследуемые параметры представляют собой взаимно независимые случайные величины. Такая гипотеза абсолютно справедлива только при условии, что все УК адекватно отображаются моделями вида  $M / M / 1 / \infty / f_0$  [70]. В третьей главе диссертационной работы было установлено, что УК могут быть представлены только более сложными моделями. По этой причине следует оценить корректность гипотезы о взаимной независимости исследуемых случайных величин.

С этой целью была использована имитационная модель, разработанная в [185]. В ней предложено оценивать степень независимости процессов, которые протекают в разных УК, не только коэффициентом корреляции [25]. Дело в том, что этот показатель не позволяет вычислить ошибки, возникающие вследствие принятия гипотезы об отсутствии взаимной связи между УК. В качестве мер независимости процессов обслуживания IP-пакетов в разных УК в составе NGN используется величина ошибки в расчете параметров  $IPTD$  и  $IPDV$ . Результаты

моделирования показали, что методика, предложенная в рекомендации МСЭ-Т YТ.1542, приемлема только для решения задач по декомпозиции показателей QoS. Ее применение для оценки показателей QoS при больших нагрузках или перегрузках УК приводит к большим ошибкам при расчете величин  $IPTD_i$ ,  $IPDV_i$  и  $IPLR_i$ . Значения ошибок измеряются разами и даже порядками, что объясняется усилением взаимной зависимости между процессами, протекающими в разных компонентах телекоммуникационной системы.

При помощи имитационной модели, предложенной в [185], был исследован и показатель  $IPLR$ . Для выбранных (в третьей главе диссертационной работы) распределений  $A(t)$  и структур NGN, соответствующих используемым на практике, результаты моделирования показали следующее:

- относительная ошибка в оценке показателей  $IPTD$ ,  $IPDV$  и  $IPLR$  составляет величину порядка 10%, что вполне приемлемо для решения поставленных задач;
- методы декомпозиции, предложенные в данном разделе четвертой главы диссертации, доказали свою корректность, так как не порождают заметных ошибок в оценке нормируемых показателей качества функционирования NGN.

После проведения декомпозиции показателей качества функционирования NGN становятся известными все величины, необходимые для реализации процедур ограничения трафика в период действия ЧС. Это позволяет разработать подробные и научно обоснованные алгоритмы функционирования УК в составе NGN. Они представлены в пятой главе диссертационной работы.

#### 4.6 Выводы по главе 4

1. Трафик, обслуживаемый сетью связи следующего поколения в период действия чрезвычайной ситуации, плохо предсказуем из-за отсутствия необходи-

мого объема статистических данных. Для получения оценок этого трафика использованы данные, полученные для аналогичного процесса, который так же, как и в случае чрезвычайной ситуации, порождается реакцией людей на событие. Изменение объема трафика в период действия предложено характеризовать асимметричным распределением Симпсона. Для описания процессов изменения трафика подходит сценарный подход, который основан на квартильном анализе. Он позволяет выделить четыре типичные ситуации для классификации последствий чрезвычайных ситуаций с точки зрения их влияния на функционирование сети связи следующего поколения.

2. Модель сети связи следующего поколения представляет собой совокупность многофазных систем массового обслуживания. Для анализа модели следует выбрать наиболее загруженный маршрут обмена IP-пакетами, так как установленные показатели качества обслуживания мультисервисного трафика должны соблюдаться для любых видов соединений между интерфейсами пользователь-сеть. Для исследуемой модели получены аналитические соотношения, позволяющие оценить все нормируемые показатели качества обслуживания мультисервисного трафика с относительной ошибкой порядка 10%. Такая погрешность вполне приемлема для решения задач, поставленных в диссертационной работе.

3. В значительной части чрезвычайных ситуаций в маршруте обмена IP-пакетами часто только один узел коммутации находится в режиме перегрузки. Для модели подобного рода получены верхние и нижние границы для характеристик, позволяющих оценить качество обслуживания мультисервисного трафика. Корректность полученных аналитических соотношений для исследованных распределений  $A(t)$  проверена и подтверждена при помощи имитационной модели.

4. Для выполнения расчетов на основании полученных аналитических соотношений необходимо оценить два параметра потока IP-пакетов на входе транзитного узла коммутации, в составе сети связи следующего поколения. Первый параметр – интенсивность входящего потока IP-пакетов. Второй параметр – коэффициент вариации длительности интервалов между моментами поступления IP-

пакетов. Для оценки этих параметров исследованы возможные подходы к их вычислению. В результате разработана методика оценки этих параметров. При помощи имитационного моделирования показано, что применение предложенной методики позволяет получить результаты с приемлемой для практики точностью.

5. Проверка введенных допущений на имитационной модели позволила сформулировать три вывода, имеющих теоретическое значение для исследования сети связи следующего поколения при возникновении чрезвычайных ситуаций разного рода.

Во-первых, объединение большого числа потоков IP-пакетов на входе транзитного узла коммутации приводит к формированию потока, близкого к пуассоновскому. Эта тенденция не зависит от вида распределений, характерных для суммируемых потоков.

Во-вторых, близость к пуассоновскому потоку зависит, в основном, от характера распределений, которые описывают складываемые потоки. В частности, при объединении пяти и более входящих потоков, представимых распределением Эрланга  $k - 20$  порядка, суммарный поток очень близок к пуассоновскому. Данное утверждение справедливо также для регулярных потоков, которые можно рассматривать как распределение Эрланга при  $k \rightarrow \infty$ . Оно остается верным и для других распределений при условии, что соблюдается такое неравенство: коэффициент вариации длительности интервалов между моментами, когда заявки покидают систему, не превышает единицу. Если объединяемые потоки описываются распределениями с так называемыми "тяжелыми хвостами", для которых этот коэффициент вариации превышает единицу, то суммарный поток становится близок к пуассоновскому только при очень большом числе объединяемых потоков. Как правило, оно превышает практически интересный диапазон изменения количества потоков, входящих в транзитный узел коммутации сети связи следующего поколения. По этой причине гипотеза о пуассоновском потоке при объединении распределений с "тяжелыми хвостами" не может быть использована.

В-третьих, зависимость коэффициента объединенного потока на входе транзитного узла коммутации от количества суммируемых потоков не меняет своего



характера при различии величин их интенсивности менее чем на порядок. Величины интенсивности потока заявок (IP-пакетов или вызовов), которые суммируются на входе транзитного узла коммутации, не одинаковы, но их отношение, судя по результатам измерений, обычно лежит в диапазоне от 1,5 до 5,0.

6. Показатели качества обслуживания мультисервисного трафика, которые установлены для штатного режима эксплуатации сети связи следующего поколения, не всегда могут обеспечиваться при возникновении чрезвычайных ситуаций. Для периода действия чрезвычайной ситуации предложен иной подход к классификации IP-пакетов и к назначению приоритета на обработку. Первый приоритет назначается трафику, который важен для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (в его состав входят служебные сообщения, необходимые для работы всех видов телекоммуникационного оборудования); второй приоритет – трафику речи, третий (самый низкий) приоритет – всем остальным видам трафика. На основании анализа доступных статистических данных и проведенных измерений были выбраны численные значения нормируемых показателей. Они обеспечивают приемлемый уровень качества обслуживания мультисервисного трафика.

7. Для предложенных показателей качества обслуживания мультисервисного трафика должна быть выполнена процедура декомпозиции. Она подразумевает определение показателей для каждого узла коммутации в составе телекоммуникационной системы. В диссертации разработан алгоритм декомпозиции нормируемых показателей, основанный на методе, который предложен в рекомендации МСЭ-Т Y.1542. Недостаток этого метода заключается в использовании гипотезы о взаимной независимости процессов, протекающих в разных компонентах телекоммуникационной системы. Для определения влияния зависимости, присущей телекоммуникационной системе, была использована имитационная модель. Результаты моделирования показали, что методика, содержащаяся в рекомендации МСЭ-Т Y.1542, порождает ошибки, значения которых не превышают порог в 10% при типичных колебаниях величин трафика. При резком росте трафика данная методика ведет к весьма существенным ошибкам – на порядок и более.

## **5. Рекомендации по организации работы телекоммуникационной системы при возникновении чрезвычайных ситуаций**

### **5.1 Особенности сосуществования канальных и пакетных технологий**

В течение длительного периода времени будут сосуществовать фрагменты ССОП, построенные на разных технологиях коммутации и передачи (канальной и пакетной), что приводит к снижению ряда показателей качества обслуживания мультисервисного трафика. Это существенно, в первую очередь, для трафика речи [187, 254]. Потенциальных проблем можно избежать только при выборе рациональной стратегии перехода к NGN (соображения по этому аспекту модернизации телекоммуникационной системы изложены в первой главе диссертационной работы). С другой стороны, корректный выбор стратегии построения NGN еще не гарантирует, что все проблемы с соблюдением показателей качества обслуживания мультисервисного трафика при возникновении ЧС будут решены автоматически.

Для анализа последнего утверждения рассмотрим процесс, показанный на рисунке 5.1. Эта модель иллюстрирует три основных этапа эволюции ТфОП в процессе перехода к NGN.

Первый этап модернизации ТфОП является началом перехода к NGN. Сравнительно небольшой фрагмент телекоммуникационной системы функционирует как полноценная NGN. С точки зрения обслуживания трафика речи, ТфОП, основанная на технологии "коммутация каналов", и NGN, которая использует пакетные принципы передачи и коммутации, представляют собой две разнородные телекоммуникационные системы. Все процедуры их взаимодействия осуществляются через шлюз.

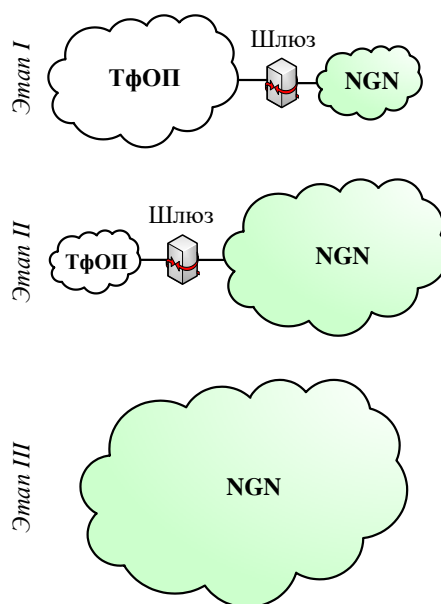


Рисунок 5.1 – Три этапа эволюции ТфОП при переходе к NGN

На рисунке 5.1 изображен только один шлюз, что достаточно для показа его функционального назначения. Для обеспечения надежности телекоммуникационной системы шлюзы разносятся на несколько площадок. Важными факторами поддержки показателей качества обслуживания, нормированных для трафика речи, следует считать:

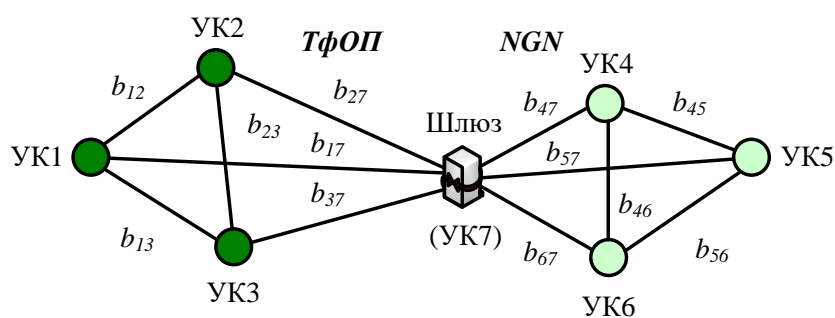
- наличие достаточных транспортных ресурсов между шлюзом и обеими взаимодействующими сетями;
- правильный выбор характеристик шлюзов, среди которых особое значение отводится их производительности.

Если соответствующие требования проанализированы и корректно реализованы при разработке проектных решений, то снижение характеристик качества обслуживания, принятых для трафика речи [24, 238], будет находиться в допустимых пределах.

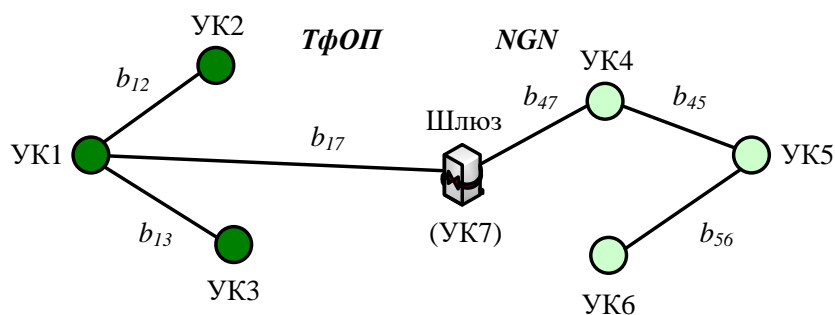
На втором этапе модернизации ТфОП увеличивается доля УК и транспортных средств на пакетных технологиях, то есть более существенная часть трафика речи обслуживается техническими средствами NGN. Требования к оборудованию шлюзов остаются неизменными. На третьем этапе модернизации ТфОП в составе телекоммуникационной системы прекращается использование технологии "ком-

мутация каналов". Шлюзы выводятся из эксплуатации, что повышает качество обслуживания трафика речи. Тем не менее, потенциально качество обслуживания речевого трафика становится несколько ниже по сравнению с теми показателями, которые могут быть обеспечены технологией "коммутация каналов".

Потенциальные проблемы, которые могут возникнуть в период действия ЧС, можно проанализировать при помощи модели, показанной на рисунке 5.2. Он универсален для первого и второго этапов модернизации ТфОП. Третий этап эволюции ТфОП не представляет интереса с точки зрения вопросов, рассматриваемых в этой главе диссертационной работы. Рассматриваемая модель включает по три УК в каждой части (ТфОП и NGN). Шлюз рассматривается как еще один УК (под номером семь).



а) Структура сети, выбранная при разработке проектных решений



б) Структура сети после возникновения ЧС

Рисунок 5.2 – Модель взаимодействия ТфОП и NGN

Рисунок 5.2.а иллюстрирует структуру сети, которая определена проектными решениями. Предполагается, что УК в каждой части связаны между собой по

принципу "каждый с каждым". Это значит, что при установлении разговорного тракта между терминалами из разных частей задействованы два УК (с разными технологиями коммутации) и шлюз.

На рисунке 5.2.б изображена одна из возможных структур сети, которая формируется при возникновении ЧС с разрушающими воздействиями. При установлении разговорного тракта между терминалами из разных частей будут, как правило, использоваться более двух УК. Например, для терминалов, включенных в УКЗ и в УК6, разговорный тракт пройдет через максимальное количество УК. Их будет шесть, включая шлюз. Именно для такой конфигурации необходима разработка мер, направленных на поддержку приемлемого уровня качества телефонной связи.

При ограничении той части трафика данных и видео, которые связаны с дополнительными видами услуг, в части NGN не возникает проблем, обусловленных чрезмерными задержками IP-пакетов. Это утверждение справедливо даже при заметном росте количества вызовов, порожденных ЧС (исключением остается трафик, направляемый в ЦОВ экстренных оперативных служб). Иная ситуация характерна для ТфОП как системы, обслуживающей только трафик речи. Поскольку ТфОП и NGN представляют собой единый объект, важной особенностью сосуществования канальных и пакетных технологий становится сбалансированность трафика. Следовательно, необходимо ограничить нагрузку из NGN в ТфОП, даже если все УК пакетного типа способны обслуживать ее с заданными качественными показателями.

Предположим, что тракты обмена информацией, обозначенные на рисунке 5.2 как  $b_{ij}$ , имеют пропускную способность, которая достаточна для обработки трафика в штатных условиях функционирования ССОП. Количество трактов  $b_{ij}$ , показанных в части ТфОП, оценивается числом используемых соединительных линий. Для части NGN такой мерой служит суммарная скорость обмена информацией, выражаемая, например, в Мбит/с.

Для трактов обмена информацией между УК4, УК5 и УК6 ограничения не устанавливаются. Ограничения могут потребоваться для трактов обмена информацией между УК1, УК2 и УК3, а также для входящей связи к ним из части NGN. Рост трафика, возникающий вследствие ЧС, следует регулировать, чтобы создать приемлемые условия функционирования телекоммуникационной системы, а также для минимизации последствий массовой паники. Решение данной задачи может осуществляться прямыми и косвенными методами управления трафиком. Сначала целесообразно использовать потенциал косвенных методов. Предлагаемые методы изложены в разделе 5.2. Если трафик не снизился до приемлемого уровня, то необходимо применить прямые методы ограничения трафика. Они рассматриваются в разделе 5.3.

Следует также учитывать, что существуют не только внешние, но и внутренние факторы, препятствующие принятию рациональных решений. Тем не менее, в существующей телекоммуникационной системе заложена возможность целенаправленного развития, ориентированного на эффективную работу сети связи при возникновении ЧС. Принципы этого развития в значительной мере зависят от корректности постановки задачи, то есть от тех требований, которым должна удовлетворять телекоммуникационная система.

Рассмотрим гипотетическую ЧС, последствия которой для структуры эксплуатируемых сетей связи проявляются в границах территории с площадью  $S_1$ . При этом, изменения характера трафика могут наблюдаться в границах территории с площадью  $S_2$ . Справедливо неравенство:  $S_2 > S_1$ . Величина  $S_1$  – прогностическая оценка, учитывающая особенности географических, климатических, демографических показателей исследуемой территории, а также те потенциальные угрозы, которые могут стать причинами природных или техногенных катастроф. Значение  $S_2$  определяется, исходя из административного деления в границах субъекта Российской Федерации.

В границах территорий с площадями  $S_1$  и  $S_2$  известен перечень работающих Операторов связи. Следовательно, доступны достоверные оценки количества

обслуживаемых пользователей  $L(S_1)$  и  $L(S_2)$ . При необходимости величины  $L(S_1)$  и  $L(S_2)$  ранжируются для выделения типичных групп пользователей на основании выбранных классификационных признаков.

В неформализованном виде задачу, которую придется решать Операторам связи, можно сформулировать как максимизацию доли обслуженного трафика. Необходимо уточнить, что подразумеваются те виды трафика, которые напрямую или косвенно способствуют ликвидации последствий ЧС, а также обеспечивают передачу информации, позволяющей оперативно решать важнейшие социально-экономические задачи. До ликвидации последствий ЧС следует ввести другие показатели качества обслуживания мультисервисного трафика, отличающиеся от норм, которые приняты для штатных условий работы телекоммуникационной системы.

Пусть задан кортеж  $(G_0, Y_0, B_0, Q_0)$ , который определяет проектные решения, реализованные Оператором связи, по следующим атрибутам телекоммуникационной системы: структура сети в виде графа  $G(a_i, b_{ij})$ , содержащего  $k$  вершин и  $l$  ребер, матрица обрабатываемого трафика  $\|Y_{ij}\|$ , матрица пропускной способности элементов сети  $\|B_{ij}\|$  и совокупность показателей качества обслуживания  $\{Q\}$ .

После наступления ЧС вплоть до ликвидации ее последствий устанавливается другая совокупность показателей качества обслуживания трафика  $\{Q^{ЧС}\}$ . Элементы множества  $\{Q^{ЧС}\}$  определяют приемлемые для пользователей свойства предоставляемых услуг. В результате возникновения ЧС меняются обе матрицы, обозначаемые далее как  $\|Y_{ij}^{ЧС}\|$  и  $\|B_{ij}^{ЧС}\|$ . Необходимо решить, как минимум, две задачи:

- выбрать такую структуру графа  $G^{ЧС}(a_i, b_{ij})$ , чтобы в нем не было изолированных вершин;

- задать значения элементов матрицы  $\|Y_{ij}^{QC}\|$  с целью обеспечения показателей качества обслуживания трафика, которые будут не хуже уровня, заданного совокупностью  $\{Q^{QC}\}$ .

В результате решения перечисленных выше задач формируется новый кортеж  $(G_{QC}, Y_{QC}, B_{QC}, Q_{QC})$ , определяющий основные аспекты функционирования NGN до ликвидации последствий ЧС. Этот кортеж формируется за счет использования сценарного подхода, что позволяет заранее проанализировать возможные значения элементов  $G_{QC}$ ,  $Y_{QC}$  и  $B_{QC}$ . Значения показателей  $\{Q^{QC}\}$  предполагаются неизменными. Кортеж  $(G_{QC}, Y_{QC}, B_{QC}, Q_{QC})$  содержит информацию об основных состояниях, в которых может находиться телекоммуникационная система при возникновении типичных ЧС. Это позволяет разработать четкую программу действия для минимизации влияния последствий ЧС на функционирование NGN.

## 5.2 Использование косвенных методов ограничения трафика

Для снижения трафика может использоваться широкая гамма различных технических средств. В ближайшие годы основная роль отводится специализированным средствам оповещения, ресурсам сетей звукового и телевизионного вещания, возможностям Интернет и услугам передачи коротких и мультимедийных сообщений, известным по аббревиатурам – SMS и MMS соответственно. Применение специализированных средств массового оповещения не входит в состав лицензионных требований, предъявляемых к Операторам связи. По этой причине ниже рассматриваются только те возможности, которые предоставляются сетями электросвязи. Каждый вид эксплуатируемых сетей способен предоставить уникальные функциональные возможности, помогающие в решении общей задачи – повышении информированности населения (а также некоторых групп специали-



стов) о характере ЧС для минимизации ее последствий и снижения вероятности возникновения паники.

Современные сети звукового и телевизионного вещания поддерживают широкий спектр услуг, часть которых следует использовать в ЧС. С технической точки зрения для использования ресурсов этих сетей не нужно решать сложные задачи. В частности, сети звукового вещания могут обеспечить передачу срочной информации за счет прерывания своих программ на время, необходимое для передачи экстренных сообщений. Такая возможность предусмотрена во всех системах звукового вещания. Основная проблема заключается, по всей видимости, в выборе такой формы предоставления сведений, которая обеспечит передачу важной информации и не приведет к панике.

Эта же проблема актуальна и для системы телевещания. Кроме прерывания текущих программ возможна передача необходимой информации в тексте "бегающей строки". Численность телевизионной аудитории (особенно – в вечернее время), как правило, заметно превышает количество абонентов звукового вещания. По этой причине использование ресурсов сетей телевизионного вещания представляется очень важным для информирования населения о происшествиях.

Значительная часть владельцев персональных компьютеров, планшетов, смартфонов и ряда других современных терминалов подключена к сети Интернет. Провайдер услуг Интернет имеет техническую возможность вывести на устройство отображения информации текст (а при необходимости – звук и видео) для информирования пользователей о возникшей ЧС. Аналогичная информация может быть направлена по "электронной почте". Для реализации такой возможности пользователи должны предварительно дать согласие на получение писем соответствующего содержания. Эти письма не должны идентифицироваться как спам программным обеспечением, которое установлено Провайдером Интернет и пользователями на своих терминалах.

Дополнительные проблемы могут возникнуть при получении информации в Интранет [215]. Правда, эти проблемы связаны с организационными, а не с техническими вопросами.

Использование SMS для передачи важной информации в ЧС – хорошо известное решение. Интересный и очень полезный опыт по передаче SMS накоплен в Швеции [249]. Практическая реализация технологии Cell Broadcast, специфицированной международной организацией 3GPP [257], позволяет снизить время рассылки SMS до нескольких минут. Такая возможность обеспечивает передачу оперативной информации для значительной группы людей, подвергающихся риску вследствие возникшей ЧС.

Некоторым абонентам (например, специалистам и волонтерам, которые должны принять участие в ликвидации последствий ЧС, а также людям с ограниченными возможностями) необходимо направить информацию с более подробными инструкциями в виде речевых сообщений по сетям фиксированной или мобильной телефонной связи. Производительность аппаратно-программных средств, решающих подобные задачи, ограничена. Следовательно, возникает задача составления расписания для передачи специальных сообщений некому множеству терминалов численностью  $N$  за допустимое время  $T_{\max}$ . Предположим, что в первую очередь, сообщение необходимо передать терминалам, находящимся ближе к эпицентру ЧС.

Геометрическая модель, показанная на рисунке 5.3, отображает территорию площадью  $S$ , в границах которой ощущаются последствия ЧС. Окружность радиусом  $r$  полностью покрывает эту территорию.

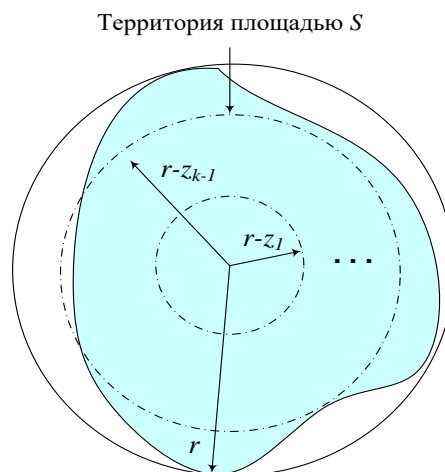


Рисунок 5.3 – Геометрическая модель для составления расписания

Будем считать, что терминалы размещаются в круге радиусом  $r$  равномерно. Внутри круга радиусом  $r$  находится  $N$  терминалов, подключенных к сетям фиксированной или подвижной связи. Если за один сеанс связи можно передать сообщения для  $n$  терминалов, то потребуется  $k$  идентичных операций, количество которых определяется отношением  $N$  к  $n$ . Территорию, в границах которой произошла ЧС, целесообразно разделить на  $k$  частей. Площадь самого маленького круга с радиусом  $r - z_1$  равна величине  $S$ , деленной на  $k$ . Это позволяет на основании простых геометрических соотношений найти значение  $z_1$ :

$$z_1 = r \cdot \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{k}} \right). \quad (5.1)$$

Вычисление величин  $z_i$  ( $i = \overline{2, k-1}$ ) для рассматриваемой модели осуществляется за счет решения квадратных уравнений. Они составляются на основании правила: площади смежных колец одинаковы. Длительность рассылки сообщений для каждой  $i$ -й ( $i = \overline{1, k}$ ) части территории площадью  $S$  занимает время  $T$ . Следовательно, суммарное время доставки всех сообщений равно  $k \cdot T$ . Должно соблюдаться такое условие:  $k \cdot T \leq T_{\max}$ .

Рассматриваемой модели присущи два спорных допущения. Во-первых, конфигурация территории площадью  $S$  не всегда может быть вписана в круг. Во-вторых, распределение потенциальных абонентов иногда заметно отличается от равномерного. В подобных случаях вместо круга следует использовать эллипсы или равносторонние треугольники. Выражения для оценки величин  $z_i$  получаются более громоздкие; по этой причине в диссертационной работе они не приводятся. Сложнее учесть неравномерность распределения потенциальных абонентов в границах рассматриваемой территории. Логичным подходом для решения такой задачи представляется составление конкретного расписания передачи специальных и приоритетных сообщений, учитывающего сложившиеся обстоятельства.

Принципы доставки специальных и приоритетных сообщений в случае ЧС или иной нештатной ситуации постоянно совершенствуются [247]. Следует под-

черкнуть, что эффективность полученной информации зависит от функциональных возможностей мобильного терминала. Например, в штате Калифорния добровольцы, прошедшие курс обучения для оказания помощи при пожарах, могут получать исчерпывающую информацию о ЧС только на терминалы класса iPhone. Доступная информация содержит, в частности, адрес нахождения ближайшего дефибриллятора.

Для получения жизненно важной информации в некоторых системах доставки SMS и MMS предполагается использование специального чипа. В частности, такой подход принят в системе PLAN (Personal Localized Alerting Network), разработанной в США [239]. Чип позволяет принимать оповещающие сообщения в приоритетном порядке.

Очевидно, что косвенные механизмы снижения лавинообразного трафика позволят (хотя бы – частично) решить поставленную задачу. Эффективность перечисленных выше возможностей оценить очень сложно даже на основе накопленной и обработанной статистики, так как каждая ЧС по-своему уникальна. Для получения количественных оценок, которые позволят выбрать подходящие технические средства, был проведен опрос двух групп респондентов путем рассылки вопросников по электронной почте.

Основная цель опросов заключалась в получении оценок, которые позволяют судить о полноте информации, доставляемой разными средствами связи. Респондентам предлагалось выставить эти оценки в диапазоне от нуля до единицы. Кроме среднего значения для каждой оценки большое значение имеет коэффициент вариации исследуемой величины, характеризующий разброс мнений респондентов.

Первая группа экспертов оценивала каждый способ получения информации о характере ЧС в диапазоне от нуля до единицы. Оценки второй группы экспертов выставлялись так, что их сумма для каждого способа получения информации о характере ЧС была равна единице. Следует подчеркнуть, что по форме вопросы задавались разные, но по своей сути они почти идентичны.

Результаты проведенных опросов приведены в таблицах 5.1 и 5.2. Результаты ответов на первый вопрос показывают, что передача специальных сообщений, создаваемых с учетом специфики ЧС и направляемых заранее определенной группе абонентов, может рассматриваться как самое эффективное средство передачи жизненно важной информации. Примечательно также и то, что соответствующий коэффициент вариации минимален. Это означает, что разброс мнений респондентов об эффективности этого способа передачи информации о характере ЧС был не столь существенным. С другой стороны, вторая группа экспертов высказала мнение о предпочтении SMS и MMS в качестве источника информации о характере ЧС. Расхождение результатов опроса, по всей видимости, отражает тот факт, что на самом деле заданный вопрос был намного сложнее, чем могло показаться на первый взгляд.

Таблица 5.1 – Оценки первой группы экспертов

Способ получения информации о характере чрезвычайной ситуации	Среднее значение	Коэффициент вариации
Звуковое вещание	0,2225	1,28
Телевизионное вещание	0,3318	0,85
Интернет, включая e-mail	0,2463	0,74
SMS и MMS	0,5344	0,49
Специально формируемые сообщения	0,6281	0,40

Таблица 5.2 – Оценки второй группы экспертов

Способ получения информации о характере чрезвычайной ситуации	Среднее значение	Коэффициент вариации
Звуковое вещание	0,06	1,77
Телевизионное вещание	0,21	0,88
Интернет, включая e-mail	0,16	0,91
SMS и MMS	0,37	0,68
Специально формируемые сообщения	0,20	1,22

Использование косвенных механизмов для снижения резкого роста трафика в период действия ЧС позволит получить полезный эффект, который можно рассматривать с двух точек зрения. Во-первых, повышение информированности населения, а также тех специалистов, которые непосредственно занимаются ликвидацией последствий возникшей чрезвычайной ситуации, позволяет минимизировать риски различного рода. Во-вторых, уменьшается рост трафика, что способствует повышению качества функционирования телекоммуникационной системы в целом. Судя по результатам проведенного опроса, наиболее эффективным средством передачи информации о характере ЧС служит формирование SMS, MMS, а также специальных сообщений, которые передаются адресно средствами сетей фиксированной и мобильной связи. Важным средством получения подобной информации служит и телевизионное вещание.

Информация, передаваемая с момента возникновения ЧС вплоть до ее полной ликвидации, играет важную роль в снижении негативных последствий, которые порождаются нештатными ситуациями [39]. Анализ динамики ряда масштабных ЧС показывает, что необходимо повысить оперативность подготовки информационных сообщений, передаваемых различными средствами электросвязи. Иными словами, следует минимизировать длину отрезка времени между моментами возникновения ЧС и передачей населению первого информационного сообщения. Задачу, которую необходимо решить, можно отнести к проблемам превентивной подготовки телекоммуникационной системы к ЧС [112, 113].

Вторая задача заключается в предоставлении максимально полной информации о характере ЧС и тех действиях, которые рекомендуется предпринять. Необходимость оперативной выдачи информации может привести к тому, что информационные сообщения не будут в должной мере отредактированы таким образом, чтобы успешно решить вторую задачу. По всей видимости, следует найти разумный компромисс между скоростью решения и его полнотой.

Опыт ликвидации последствий ЧС свидетельствует об опасности возникновения массовой паники [145, 245]. Для предотвращения подобных явлений необходим контроль всех формируемых информационных сообщений специалистами

по стрессовым ситуациям. Таким образом, третья задача связана с двумя предыдущими, образуя единый комплекс проблем.

Минимизация времени на подготовку информационных сообщений достигается их составлением из заранее разработанной библиотеки модулей. Если эти модули предназначены для формирования речевых сообщений, то их основная часть должна выбираться из предварительно записанных фраз с заданными качественными показателями. Это положение справедливо и для блоков визуальной информации, отображаемой, в частности, на специализированных табло. Составление сообщений всех видов должно осуществляться уполномоченными специалистами. Состав предварительно записанных фраз, а также визуальных и текстовых блоков должен быть согласован основными участниками ликвидации последствий ЧС.

Программное обеспечение, используемое для формирования информационных сообщений, следует разрабатывать с учетом тех возможностей, которые характерны для когнитивных технологий. Такой подход обеспечит постоянное смысловое совершенствование информационных сообщений, а также снижение времени на их создание.

Уровень информированности населения зависит, в основном, от адекватности оценки последствий ЧС. Оценки такого рода напрямую не связаны с процессами функционирования телекоммуникационной системы. Задача телекоммуникационной системы заключается в оперативной передаче необходимой информации с заданными качественными показателями. Тем не менее, количественную меру информированности населения можно получить из кривой  $Y_s(t)$ , которая отражает процесс изменения той части абонентского трафика, которая направлена на установление соединений с рабочими местами операторов в составе экстренных оперативных служб.

Рассмотрим три непересекающихся отрезка времени  $(t_1, t_2)$ ,  $(t_3, t_4)$  и  $(t_5, t_6)$ . Точка  $t_1$  определяет момент времени, когда начинают ощущаться последствия ЧС. На отрезке времени  $(t_1, t_2)$ , как правило, начинается лавинообразный рост

трафика, что отражает соответствующий фрагмент функции  $Y_S(t)$ , которая показана на рисунке 5.4. Предполагается, что решения по управлению трафиком принимаются оперативно. Тогда справедливы следующие соотношения:  $Y_S(t_2) \approx Y_S(t_3)$  и  $Y_S(t_4) \approx Y_S(t_5)$ .

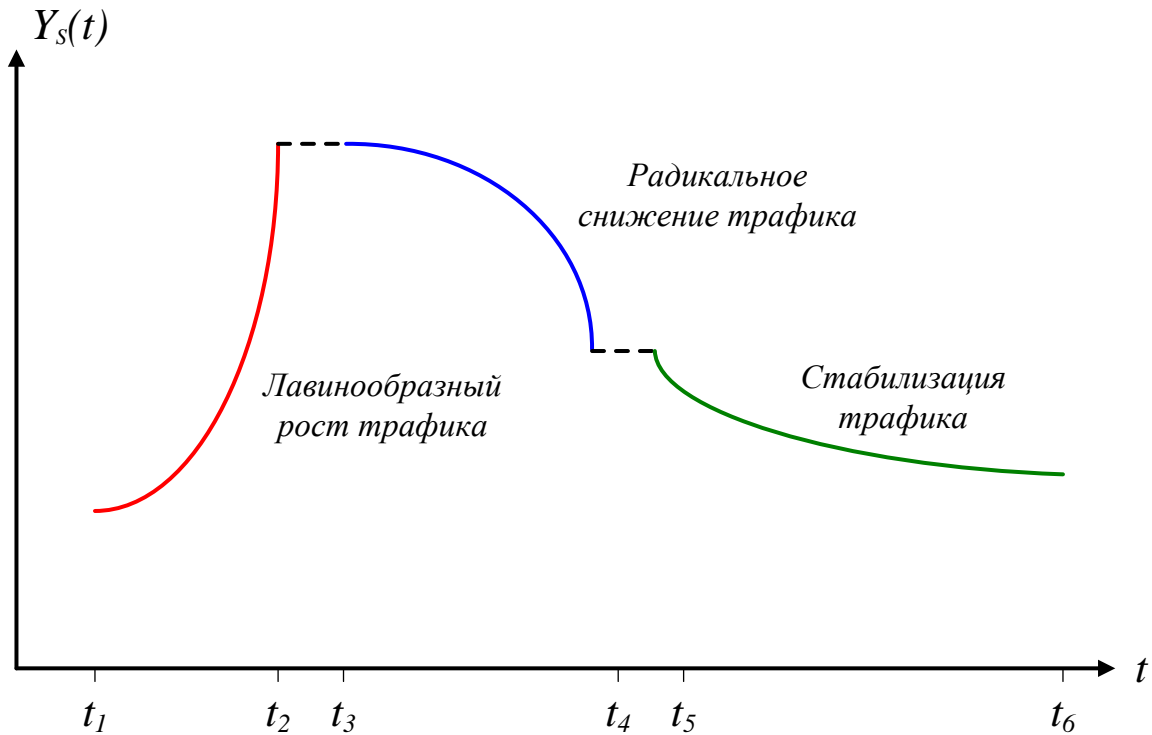


Рисунок 5.4 – Типичный пример поведения функции  $Y_S(t)$

В течение периода времени  $(t_3, t_4)$  выполняются основные операции по снижению трафика, изложенные в начале данного раздела. Не исключено, что значение  $Y_S(t_4)$  будет чрезмерно большим с точки зрения штатных условий функционирования телекоммуникационной системы. В этом случае задействуются дополнительные механизмы снижения трафика [112, 113]. В результате к моменту времени  $t_6$  величина трафика становится вполне приемлемой для эффективной работы телекоммуникационной системы. Не исключено, что на отрезке времени  $(t_5, t_6)$  стабилизация трафика будет обусловлена характером процесса ликвидации последствий ЧС. В подобных случаях в использовании дополнительных механизмов снижения трафика нет никакой необходимости.



Об информированности населения о характере ЧС можно судить по функции  $Z(t)$ , которая определяется зависимостью  $Y_S(t)$ . Для оценки функции  $Z(t)$  используется следующее соотношение:

$$Z(t) = \frac{Y_S(t_1)}{Y_S(t)}. \quad (5.2)$$

Если  $t < t_6$ , то для подавляющего большинства ЧС справедливо неравенство такого вида:  $Z(t) < 1$ . Измерение функции  $Z(t)$  осуществляется с неким периодом  $\tau$ . Это позволяет представить зависимость  $Z(t)$  в виде ступенчатой функции, выражаемой через преобразование Лапласа-Стилтьеса  $\xi(s)$ . Полагая, что  $t_1 = 0$ , а отношение  $t_6$  к  $\tau$  равно  $L$ , функцию  $\xi(s)$  можно представить в такой редакции [47]:

$$\xi(s) = \sum_{i=0}^L P_i \cdot e^{-i\tau s}. \quad (5.3)$$

Величина  $P_i$  соответствует значению функции  $Z(t)$  в точке  $t = i \cdot \tau$ . По правилам нахождения моментов случайной величины по изображению [47] можно найти все числовые характеристики функции  $Z(t)$ , определяющие ее поведение. Такой анализ позволит количественно оценить степень информированности населения в период ликвидации последствий ЧС.

Принято выделять два необходимых условия для возникновения слухов [145]:

- интерес к теме (он всегда и мгновенно формируется в ЧС);
- дефицит надежной информации (что часто сопутствует начальному периоду ЧС).

Уровень дефицита надежной информации  $D(t)$  к моменту времени  $t$  обратно пропорционален количеству непротиворечивых официальных сообщений  $K(t)$  и доверию к источнику полученных сведений  $H(t)$  [145]:

$$D(t) = \frac{1}{K(t) \cdot H(t)}. \quad (5.4)$$

Следовательно, для минимизации вероятности возникновения паники необходима поддержка двух важных процессов. Первый процесс – периодическая доставка из ситуационных центров (или иных аналогичных подразделений) официальных сообщений, содержащих информацию, важную для населения, а также тех специалистов, которые заняты ликвидацией последствий ЧС. Второй процесс связан с полнотой и адекватностью передаваемой информации, что повышает доверие к ее источнику.

### **5.3 Алгоритмы функционирования узлов коммутации при чрезвычайных ситуациях**

#### **5.3.1 Алгоритм ограничения трафика**

В этом разделе рассматриваются два типа УК, используемые в составе ССОП. Один тип УК находится в части ТфОП. Он использует технологию "коммутация каналов". Второй тип УК расположен в части NGN. Он выполняет функции распределения информации на основе технологии "коммутация пакетов". Под заявкой для обоих типов УК понимается вызов, цель которого заключается в установлении соединения. В этом смысле оба типа УК идентичны, если их поведение анализировать как процессы в "черных ящиках". Максимальная производительность  $i$ -го УК  $\mu_i$ , предназначенная для обслуживания вызовов, известна. Необходимо так определить допустимую интенсивность обслуживаемого потока заявок  $\lambda_i$ , чтобы соблюдались нормы на вероятность потерь  $\pi_j$ .

Вероятность  $\pi_j$  для штатных условий функционирования ССОП нормируется с различиями по уровням иерархии ТфОП. Иными словами нижний индекс " $j$ " определяет вид соединения – внутривыделенное, с экстренными оперативными службами, местное (с разными нормами для городской и сельской сети),

внутризоновое, междугородное и международное. В период времени между возникновением ЧС и ликвидацией ее последствий необходимо определить два значения для нижнего индекса "j". Вероятность  $\pi_1$  определяет допустимые потери для установления исходящих соединений к ЦОВ экстренных оперативных служб. Для всех остальных видов соединений (исходящих и входящих) устанавливается вероятность потерь  $\pi_2$ .

ССОП в период действия ЧС функционирует в экстремальных условиях. По этой причине нормы  $\pi_1$  и  $\pi_2$  должны рассматриваться как желаемые, но не всегда выполнимые требования. Величину  $\pi_1$  можно определить как 1%, а уровень  $\pi_2$  выбрать как максимальное значение из рекомендации МСЭ-Т E.721 [235] – 5%. При наличии технической возможности вызовы, направляемые в ЦОВ экстренных оперативных служб, должны обслуживаться с приоритетом.

Методы снижения трафика ЦОВ экстренных оперативных служб изложены в третьей главе диссертационной работы. В этом разделе основное внимание уделяется суммарному трафику, обслуживаемому УК. Этот трафик порождается потоком вызовов, который представим ФР произвольного вида, обозначаемой как  $A(t)$ . Длительность обслуживания заявок представляет собой случайную величину с распределением  $B(t)$ . Тогда УК может рассматриваться как СМО вида  $G/G/V/0/f_0$ . Поставленная задача сводится к ограничению величины  $\lambda_i$  и управлению распределениями  $A(t)$  и  $B(t)$  за счет следующих операций:

- введения пауз с регулируемой длительностью  $\tau_i$  между обслуживанием вызовов, поступающих с одного и того же терминала;
- ограничения времени разговора величиной  $X_i$ , значения которой могут варьироваться в зависимости от нагрузки, обрабатываемой  $i$ -ым УК.

Далее нижние индексы "i" и "j" использоваться не будут, так как алгоритм ограничения трафика универсален для УК любой емкости и не зависит от используемой технологии коммутации. При этом под величиной вероятности потерь  $\pi$

понимается значение  $\pi_2$ . Обеспечение нормы потерь  $\pi_1$  осуществляется за счет приоритетного обслуживания соответствующих вызовов.

Пример алгоритма, используемого для ограничения трафика, показан на рисунке 5.5. Текущее значение трафика  $Y$  определяется отношением  $\lambda$  к  $\mu$ . Величина  $Y_{MAX}$  выбирается так, что бы величина потерь вызовов не превосходила выбранный уровень  $\pi$ . В качестве исходной точки для оценки величины  $Y_{MAX}$  можно выбрать допустимую интенсивность нагрузки, обслуживаемую полностью пучком емкостью  $V$ , при норме потерь  $\pi$ . Вычисление такой оценки величины  $Y_{MAX}$  осуществляется по первой формуле Эрланга [79]. Следует подчеркнуть, что предлагаемый алгоритм направлен также на решение проблем, обусловленных повторными вызовами [191].

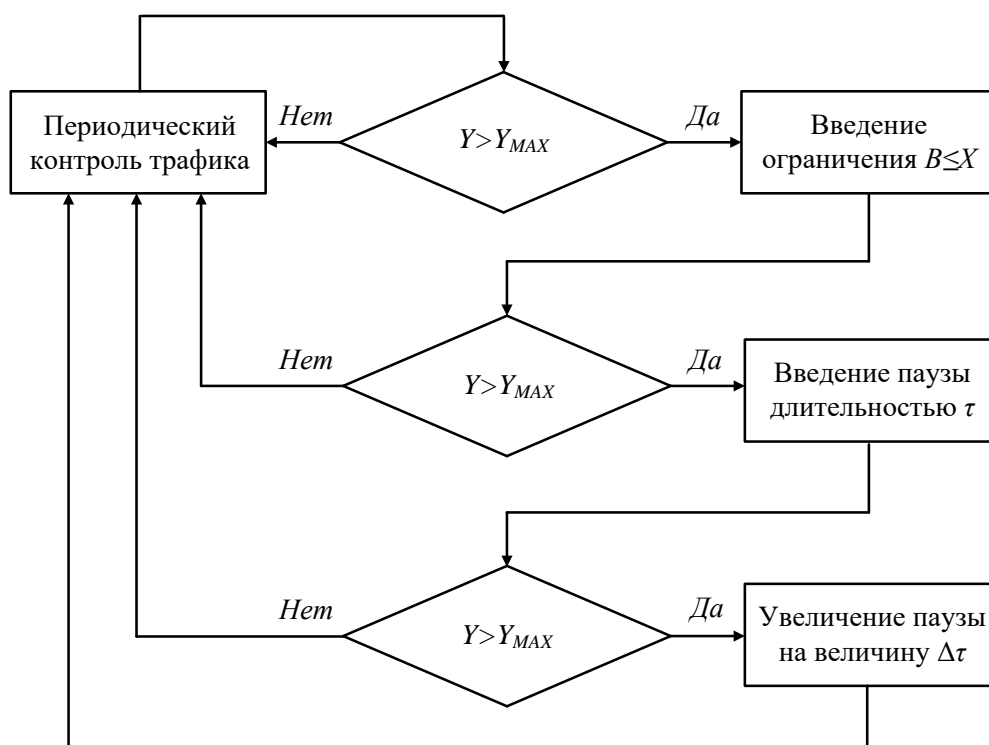


Рисунок 5.5 – Алгоритм ограничения трафика в узле коммутации

Если справедливо неравенство  $Y > Y_{MAX}$ , то первая процедура по ограничению трафика сводится к введению ограничения времени разговора. Оно задано как условие  $B \leq X$ . Величину  $X$  следует выбрать так, чтобы за время разговора можно было обменяться необходимой информацией. Исторически сложилось так,

что минимальная длительность междугородного соединения устанавливалась равной трем минутам. Введение такого ограничения было следствием дефицита ресурсов ТфОП (никак не обусловленных ЧС). Это значение  $X$  можно принять в качестве исходной точки, подлежащей уточнению по мере накопления опыта использования предлагаемого алгоритма.

После введения ограничения  $B \leq X$  продолжается контроль величины  $Y$ . Если процедура ограничения времени разговора не привела к желаемому результату (неравенство  $Y > Y_{MAX}$  остается справедливым), вводится пауза длительностью  $\tau$  до следующей попытки осуществить вызов. Это правило не используется, если абонент набирает номер экстренных оперативных служб.

После введения пауз также продолжается контроль величины  $Y$ . Если и эта процедура не привела к желаемому результату, то длительность паузы увеличивается на величину  $\Delta\tau$ . Данная операция выполняется несколько раз, хотя подобная возможность должна быть использована только после накопления статистической информации о работе предложенного алгоритма.

Анализ предлагаемого алгоритма ограничения трафика следует начать с исследования влияния вида функции  $A(t)$  на характеристики QoS. Этот анализ основан на результатах исследования влияния функции  $A(t)$  на качество обслуживания вызовов в системе с явными потерями [209].

### 5.3.2 Алгоритм изменения атрибутов трафика

Операции "Введение паузы длительностью  $\tau$ " и "Увеличение паузы на величину  $\Delta\tau$ ", показанные на рисунке 5.5, меняют вид входящего потока заявок. Эффективность обеих процедур можно показать на примере изменения вероятности  $E(Y, V)$ , определяющей величину потерь вызовов в полнодоступном пучке емкостью  $V$ , который обслуживает нагрузку с интенсивностью  $Y$ . На рисунке 5.6

приведено семейство кривых, заимствованных из монографии [209]. Время обслуживания предполагается случайной величиной, распределенной по экспоненциальному закону.

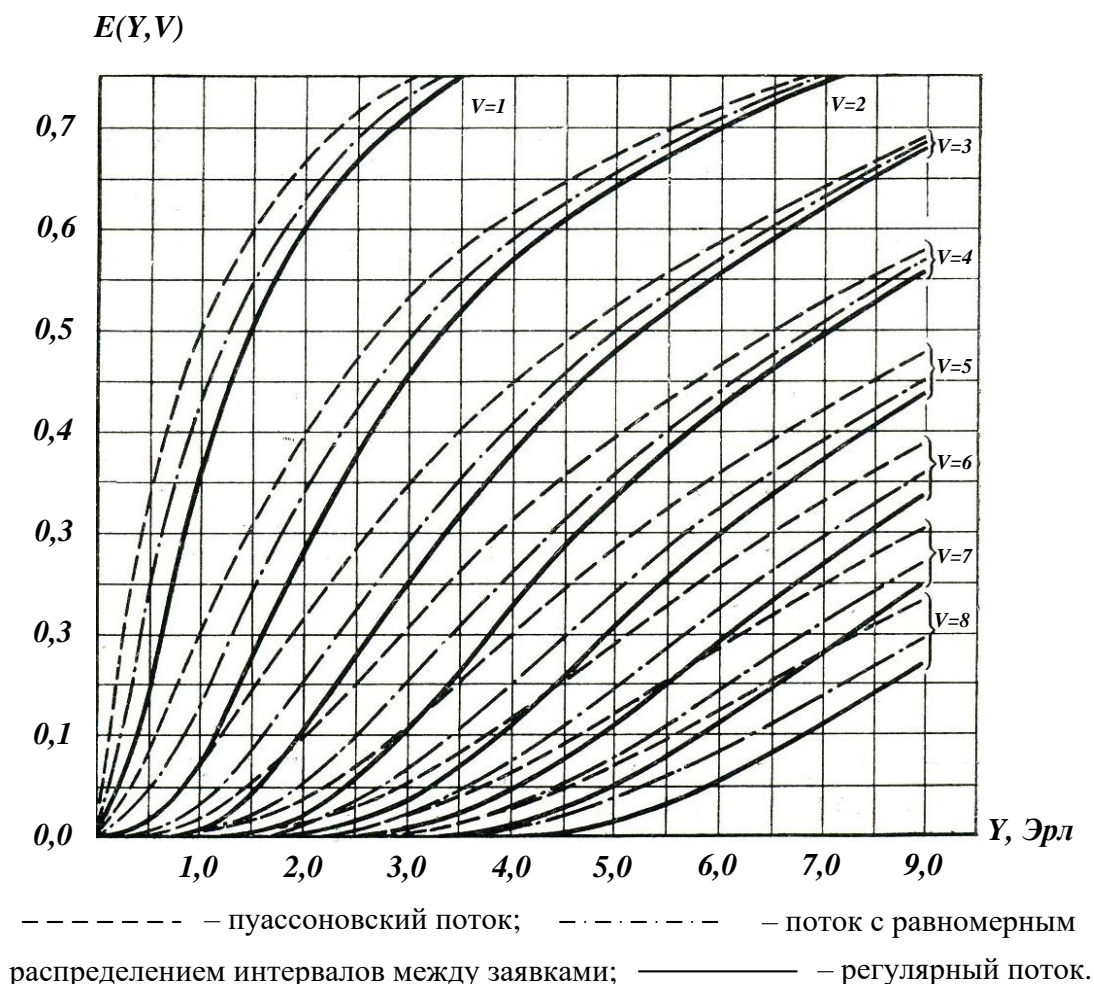


Рисунок 5.6 – Вероятность потерь  $E(Y, V)$  при разных видах функции  $A(t)$

Поведение кривых свидетельствует о существенном различии величин  $E(Y, V)$  для трех видов исследуемых потоков. Причем "худшим" потоком из анализируемых потоков – с точки зрения наибольшей величины  $E(Y, V)$  – является пуассоновский поток вызовов.

В период действия режима ЧС входящий поток вызовов будет отличаться от пуассоновского еще большей вероятностью отказа в обслуживании [95, 107]. Вид распределений  $A(t)$  таков, что  $C_A > 1$ . Введение паузы длительностью  $\tau$  решает две задачи. Во-первых, в  $k$  раз снижается интенсивность потока вызовов  $\lambda$ . Это эквивалентно уменьшению в  $k$  раз интенсивности трафика  $Y$ . Во-вторых, снижа-

ется коэффициент вариации  $C_A$ , который – теоретически – можно свести к нулю, преобразуя входящий поток вызовов в регулярный поток.

Для оценки величины  $k$  рассмотрим процесс, который называется просеиванием потоков вызовов [133]. Для типичных УК в составе ТфОП исходный поток вызовов считается пуассоновским [70, 133, 209]. Допустим, что ко всем вызовам применяется следующий алгоритм фильтрации: с вероятностью  $r$  заявка обслуживается, а с вероятностью  $(1-r)$  теряется. Поток вызовов, поступающих в УК, будет просеянным. Такая процедура фильтрации называется рекуррентной операцией просеивания. Поток вызовов, поступающих в УК, будет рекуррентным [209].

Из пуассоновского потока с интенсивностью  $\lambda$  рекуррентная операция просеивания создает также пуассоновский поток с интенсивностью  $r\lambda$ . Это означает, что разделение пуассоновского потока на ряд компонентов, которое осуществляется с помощью рекуррентной операции просеивания, формирует несколько пуассоновских потоков. Параметр каждого потока определяется произведением  $\lambda$  на величину соответствующей вероятности.

В рассматриваемом алгоритме процедура просеивания отлична от рекуррентной. По этой причине характер потока заявок будет меняться [133]. Пусть  $m$  вызовов теряются, а вызов под номером  $(m+1)$  поступает в УК и так далее. В этом случае из пуассоновского потока будет формироваться поток Эрланга  $m$ -го порядка. В потоках Эрланга любого порядка интервалы времени между вызовами независимы и распределены по одному и тому же закону. Поэтому потоки Эрланга относятся к классу рекуррентных [133]. Для математического ожидания и дисперсии интервала времени между вызовами в потоке Эрланга  $m$ -го порядка, а также для коэффициента вариации этой случайной величины справедливы такие формулы [19]:

$$A^{(1)} = \frac{m+1}{\lambda}, \quad \sigma_A^2 = \frac{m+1}{\lambda^2}, \quad C_A = \frac{1}{m+1}. \quad (5.5)$$

Если вызовы не теряются (в этом случае  $m \equiv 0$ ), то коэффициент вариации равен единице. Следовательно, поток становится пуассоновским. При  $m \rightarrow \infty$  поток становится похожим на регулярный. Интенсивность просеянного потока  $\lambda_m$  определяется очевидным соотношением:

$$\lambda_m = \frac{\lambda}{m+1}. \quad (5.6)$$

Первая операция по снижению трафика в алгоритме, показанном на рисунке 5.5, основана на ограничении времени обслуживания вызовов. Пропускную способность УК в составе ТфОП рекомендуется рассчитывать для значений эталонной нагрузки (Reference Load) – "А" и "В" [232]. В общем случае обозначим эти уровни как  $Y_{RL}$ . Для  $j$ -го пучка каналов емкостью  $V_j$  интенсивность потока вызовов  $\lambda_j$  при известной средней величине времени обслуживания  $B_j^{(1)}$  оценивается так [232]:

$$\lambda_j = \frac{Y_{RL} \cdot V_j}{B_j^{(1)}}. \quad (5.7)$$

Величину  $X$ , которая равна длительности разговора, ограничиваемой в период действия режима ЧС, удобно рассматривать как разницу  $B_j^{(1)} - T_j$ . Оценку величины  $T_j$  при возрастании интенсивности потока вызовов до уровня  $\lambda_j + \Delta\lambda_j$  несложно получить на основании соотношения (5.7), полагая величину  $Y_{RL}$  неизменной:

$$\frac{\lambda_j \cdot B_j^{(1)}}{V_j} = \frac{(\lambda_j + \Delta\lambda_j) \cdot (B_j^{(1)} - T_j)}{V_j} \Rightarrow T_j = \frac{\Delta\lambda_j \cdot B_j^{(1)}}{\lambda_j + \Delta\lambda_j}. \quad (5.8)$$

Для пучка емкостью в 30 каналов при эталонной нагрузке "А", определенной в [232] величиной 0,7, принимая среднее значение времени обслуживания в 140 с, соотношение (5.7) дает оценку  $\lambda_j = 0,15 \text{ с}^{-1}$ . Предположим, что вследствие ЧС интенсивность потока вызовов выросла в 2,5 раза. Это значит, что  $\Delta\lambda_j = 1,5 \cdot \lambda_j$ . Тогда величина  $T_j$ , вычисленная по формуле (5.8), дает оценку в 100 секунд. Следовательно, время обслуживания необходимо ограничить 40 секундами. Предпо-



ложим, что эта величина определена как нижняя допустимая граница времени разговора, то есть  $X \geq 40$  с. Если количество вызовов продолжает расти (выполняется условие " $Y > Y_{MAX}$ ", содержащееся внутри среднего ромба на рисунке 5.5), то необходимо вводить паузы между попытками вызова с одного и того же терминала.

Введение пауз, как было отмечено выше, позволяет решить две задачи, направленные на снижение интенсивности потока вызовов  $\lambda$  и коэффициента вариации  $C_A$ . Анализ кривых, приведенных на рисунке 5.6, показывает, что при перегрузке вид функции  $A(t)$  не столь существенен. Этот факт подтверждают и результаты имитационного моделирования, проведенные для СМО разного вида. В таблице 5.3, в качестве примера, приведены результаты моделирования СМО вида  $Weibull / E_5 / 1 / 0 / f_0$  для двух значений загрузки – 0,80 и 0,95. Коэффициент  $C_A$  меняется от 2 до 10. Значение  $C_A = 1$  соответствует частному случаю исследуемой СМО – системе с пуассоновским потоком заявок. Результаты моделирования многолинейной СМО с аналогичными свойствами приведены в Приложении В.

Таблица 5.3 – Вероятности потерь заявок в СМО вида  $Weibull / E_5 / 1 / 0 / f_0$

Загрузка СМО	$C_A = 1$	$C_A = 2$	$C_A = 5$	$C_A = 10$
0,80	0,44	0,48	0,59	0,69
0,95	0,49	0,52	0,62	0,70

Достижимый эффект, вследствие снижения величины  $C_A$ , измеряется процентами, а не разами. По этой причине основное внимание следует уделить той оценке, которая обусловлена снижением интенсивности входящего потока вызовов. Обозначим длительность периода времени, в течение которого происходит существенная перегрузка, как  $T_{qC}$ . Для узла коммутации емкостью  $N$  терминалов телефонной связи несложно оценить максимум потенциального количества вызовов  $\Lambda_{qC}$ , которое генерируется абонентами:

$$\Lambda_{qC} = \frac{\gamma \cdot N \cdot T_{qC}}{X + \Delta X}. \quad (5.9)$$

Коэффициент  $\gamma$  учитывает долю абонентов, находящихся рядом с терминалом в период  $T_{\text{чс}}$ . Для абонентов сотовых сетей можно считать, что  $\gamma = 1$ . Для абонентов фиксированного компонента ТфОП эта величина находится в диапазоне от 0,5 до 0,9 в зависимости от времени суток. Слагаемое  $\Delta X$  определяет среднее значение длительности паузы между двумя вызовами. Доступные статистические данные показывают, что отношение  $\Delta X$  к  $X$  не превышает 5%. Для получения приближенных оценок можно считать, что  $\gamma = 1$  и  $\Delta X = 0$ . Имеющиеся статистические данные и опросы эксплуатационного персонала сетей фиксированной и мобильной связи свидетельствуют, что обслуживать количество вызовов, равное  $\Lambda_{\text{чс}}$ , невозможно даже при вероятности потерь, в несколько раз превышающей норму потерь для периода действия ЧС.

Для снижения величины  $\Lambda_{\text{чс}}$  в соответствии с алгоритмом, приведенном на рисунке 5.5, вводится пауза длительностью  $\tau$  после каждой попытки вызова. Для любого УК несложно оценить допустимое количество вызовов  $\lambda_{\text{дон}}$ , обрабатываемых в секунду (или иную единицу времени), в расчете на один терминал. В худшем случае (с точки зрения перегрузки УК) с одного терминала будет осуществляться попытка вызова каждые  $\tau$  секунд. Для устойчивой работы УК должно соблюдаться очевидное условие, из которого можно получить оценку для значения  $\tau$  [70]:

$$\lambda_{\text{дон}} \cdot \tau < 1 \Rightarrow \tau < \frac{1}{\lambda_{\text{дон}}}. \quad (5.10)$$

Величина  $\tau$ , полученная из соотношения (5.10), представляет собой максимальное значение паузы. Оно соответствует ситуации, при которой каждая попытка вызова заканчивается неудачей. Далее это значение паузы обозначается как  $\tau_{\text{max}}$ . Для получения минимального значения исследуемой величины  $\tau_{\text{min}}$  можно ввести предположение, что каждая попытка вызова была успешной. Тогда значения  $\tau_{\text{min}}$  и  $\tau_{\text{max}}$  определяются такими соотношениями:

$$\tau_{\text{min}} = \frac{1}{\lambda_{\text{дон}}} - X, \quad \tau_{\text{max}} = \frac{1}{\lambda_{\text{дон}}}. \quad (5.11)$$

Приемлемое значение  $\tau$  всегда будет находиться между оценками  $\tau_{\min}$  и  $\tau_{\max}$ . Это означает, что для вычисления текущего значения  $\tau$  можно использовать, например, метод "деления отрезка пополам" [179]. Упрощенный фрагмент соответствующего алгоритма приведен на рисунке 5.7. Упрощения, использованные в предложенном алгоритме, связаны с рядом второстепенных деталей. Современное оборудование коммутации позволяет легко реализовать предлагаемый алгоритм. В качестве границ  $\tau_{\min}$  и  $\tau_{\max}$ , в принципе, могут быть использованы оценки, полученные эксплуатационным персоналом в процессе измерения трафика.

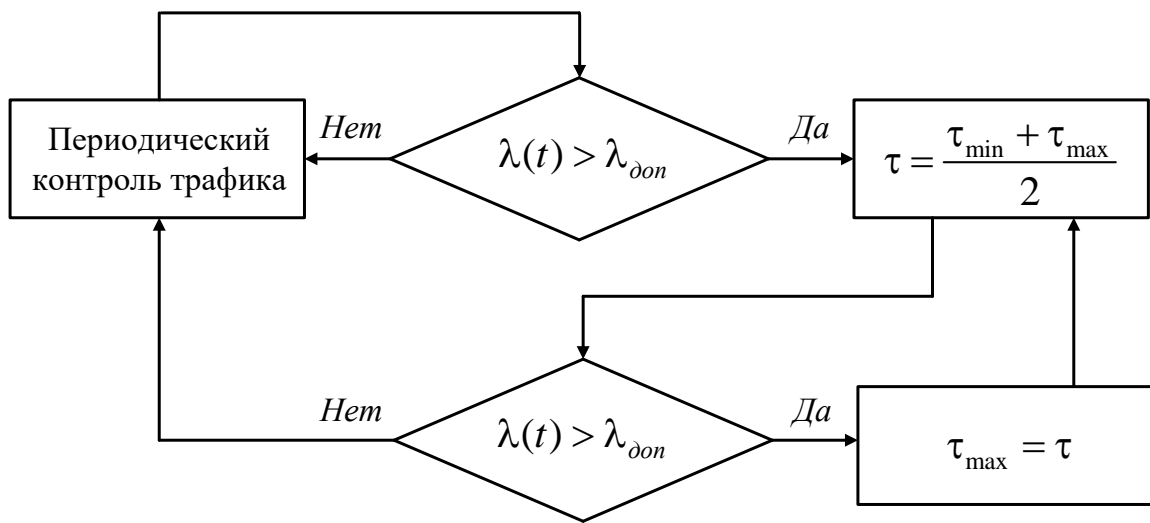


Рисунок 5.7 – Алгоритм оценки величины паузы между попытками вызова

Для проверки эффективности предложенного алгоритма была использована имитационная модель. Она позволила провести исследование работы алгоритма при разных видах функции  $\lambda(t)$ . Модель подтвердила интуитивно понятный факт: простота вычислений текущего значения  $\tau$  позволяет быстро реагировать на рост трафика даже при существенном возрастании не только функции  $\lambda(t)$ , но и ее производной. Более того, при лавинообразном росте трафика иногда наблюдается рост второй и даже третьей производной функции  $\lambda(t)$ . Использование алгоритма, предложенного для оценки величины паузы между попытками вызова, показало его работоспособность и в подобных ситуациях.

#### **5.4 Алгоритм анализа связности после наступления разрушающих воздействий**

Обеспечение устойчивой работы телекоммуникационной системы после отказа ряда ее компонентов – одна из самых актуальных задач в период действия ЧС [4, 119, 175, 211]. В значительной мере связность сети электросвязи зависит от проектных решений и характеристик разрушающих воздействий. Важную роль играет также наличие тщательно разработанного алгоритма управления ресурсами, которые остаются доступными после наступления разрушающих воздействий. Для составления такого алгоритма необходимо предложить методику и алгоритмы построения минимальных остовных частей [166] гиперсети, которая используется в качестве модели NGN [119].

При выборе способа организации связей между УК возникают задачи поиска структуры сети с заданными технико-экономическими показателями. Эти задачи – при использовании модели в виде графа или гиперсети – могут быть представлены следующими типичными примерами [12, 166, 187]:

- поиск наименьшего циклического маршрута, проходящего через заданное множество вершин гиперсети;
- задача поиска минимального дерева, связывающего заданное подмножество вершин гиперсети (дерево Штейнера);
- задача поиска части графа с заданной связностью, содержащей выделенные вершины;
- задача поиска покрывающей сети, которой соответствует минимальная (по стоимости) остовная часть гиперсети с заданной степенью связности.

Следует отметить, что первые три задачи наиболее изучены [13, 171]. Последняя задача исследована не достаточно. Описаны алгоритмы задач, близких к поставленной. В частности, разработаны отдельно алгоритмы синтеза гиперсетей

с заданными характеристиками связности и алгоритмы синтеза оптимальных структур гиперсетей [166]. Причем в данных алгоритмах упор делается либо на характеристики связности (в первом случае), либо на оптимальность (во втором случае). Почти все алгоритмы относятся к классу эвристических [166]. Обозначения, используемые ниже, были введены в разделе 2.1 второй главы диссертационной работы.

Маршрут в гиперсети  $S$  представляет собой конечную последовательность  $\mu = (x_1, r_1, x_2, r_2, \dots, x_{k-1}, r_{k-1}, x_k)$ , составленную из элементов  $X, R$  таким образом, что вершины и ребра чередуются, а всякие два соседних элемента модели – инцидентны. Квазимаршрутом в гиперсети  $S$  является конечная последовательность  $\mu = (x_1, r_1, x_2, r_2, \dots, x_{k-1}, r_{k-1}, x_k)$ , в которой соседние элементы  $(x_i, r_i)$  инцидентны, а  $(r_i, x_{i+1})$  – слабо инцидентны. Два элемента из разных множеств слабо инцидентны, если найдется элемент из третьего множества, инцидентный им обоим. Если в определении маршрута "инцидентность" заменить на "слабую инцидентность" то образуется определение "слабого маршрута". Понятие "относительный маршрут" в гиперсети  $S$  совпадает с понятием маршрута в графе  $PS = (X, V)$ .

Связность любой структурной модели определяется, с одной стороны, способом достижимости вершин (типом маршрута), а с другой стороны – типом и характером удаления элементов из структурной модели. Гиперсеть называется связной, если и только если между парой вершин гиперсети  $S$  существует соединяющий их маршрут. Гиперсеть называется квазисвязной, если и только если для любых вершин  $x, y$  из  $S$  существуют квазимаршруты  $\mu(x, y)$  и  $\mu(y, x)$ . Гиперсеть называется слабо связной, если и только если любая пара вершин соединима слабым маршрутом. Гиперсеть называется относительно связной, если граф  $PS$  связан. Понятие " $K$  – связности" вводится для оценки влияния способа удаления элементов из гиперсети.

Пусть задана  $K$  – связная гиперсеть  $PS = (X, V, R)$ . Величины  $s(r_i)$  и  $s(v_i)$  и  $s(v_i)$  определяют веса ребер и ветвей соответственно. Требуется найти минималь-

ную (по весу) остовную часть гиперсети с требуемой связностью  $P$ , которая удовлетворяет неравенству  $P < K$ :

$$\sum_{i=1}^n c_i \cdot s(r_i) + \sum_{i: v_i \in \bigcup_{k=1}^n F(r_k)} d_i \cdot s(v_i) \rightarrow \min_{c_i, d_i \in \{0,1\}}. \quad (5.12)$$

Общая задача делится на две большие подзадачи. Это деление зависит от того известно отображение  $F$  или нет. Первая подзадача выглядит следующим образом: дана первичная сеть  $PS$ , дана вторичная сеть  $WS$  и известно отображение  $F$ . Иными словами, известно вложение вторичной сети в первичную. Таким образом, структура гиперсети полностью задана, и на этой структуре требуется решить задачу (5.12).

Вторая подзадача представима в такой постановке. Дана первичная сеть  $PS$ , дана вторичная сеть  $WS$ , отображение  $F$  не известно. Тогда, решая задачу (5.12), требуется синтезировать гиперсеть. В зависимости от того, какую подзадачу требуется решить, возникают разные подходы решения, но в любом случае необходимо определять маршруты в гиперсетях. В монографии [166] приведена таблица сложности определения связности в гиперсетях в зависимости от типа маршрута. Из этой таблицы следует, что каждая подзадача требует анализа шестнадцати вариантов в зависимости от вида рассматриваемого маршрута и типа удаления элементов.

Таким образом, на основании этой таблицы каждая из двух подзадач делится, в свою очередь, на 16 задач каждая, в зависимости от того, какой маршрут и тип удаления будет рассматриваться. Это позволяет переформулировать задачу (5.12). С этой целью следует дополнить обозначения и привести некоторые комментарии.

Как уже было сказано выше, понятие  $K$  –связанности определяется способом удаления элементов гиперсети. Так, например, при поиске реберной связности  $\lambda_r$ , когда в гиперсети исследуются маршруты, под  $K$  –связанностью понимается минимальное число ребер, удаление которых приводит к несвязанной (в смысле отсутствия маршрута) гиперсети. Обозначим эту характеристику –

$\lambda_r(MR)$ . Аналогично определяются характеристики  $\lambda_r(MV)$ , а также  $\omega(MX_1)$  – при удалении вершин в случае поиска маршрута,  $\omega^1(MX_2)$  – при внешнем удалении вершин и  $\omega^0(MX_3)$  – при внутреннем удалении вершин.

Для квазимаршрута аналогично определяются следующие атрибуты:  $\lambda_r(KR)$ ,  $\lambda_v(KV)$ ,  $\omega(KX_1)$ ,  $\omega^1(KX_2)$  и  $\omega^0(KX_3)$ . Для слабого маршрута получаем:  $\lambda_r(CR)$ ,  $\lambda_v(CV)$ ,  $\omega(CX_1)$ ,  $\omega^1(CX_2)$  и  $\omega^0(CX_3)$ . Для относительного маршрута определяются два атрибута:  $\lambda_v(OV)$  и  $\omega(OX_1)$ .

На основании введенных выше обозначений рассматриваемая задача будет иметь следующий вид. Пусть задана  $K = \lambda_r(MR) (\lambda_r(MV), \omega(MX_1), \omega^1(MX_2), \omega^0(MX_3), \lambda_r(KR), \lambda_v(KV), \omega(KX_1), \omega^1(KX_2), \omega^0(KX_3) \lambda_r(CR), \lambda_v(CV), \omega(CX_1), \omega^1(CX_2), \omega^0(CX_3), \lambda_v(OV), \omega(OX_1))$ -связная гиперсеть  $S = (X, V, R)$ . Требуется найти минимальную (по весу) остовную часть гиперсети с требуемой связностью  $P = \lambda_r(MR) (\lambda_r(MV), \omega(MX_1), \omega^1(MX_2), \omega^0(MX_3), \lambda_r(KR), \lambda_v(KV), \omega(KX_1), \omega^1(KX_2), \omega^0(KX_3) \lambda_r(CR), \lambda_v(CV), \omega(CX_1), \omega^1(CX_2), \omega^0(CX_3), \lambda_v(OV), \omega(OX_1))$  при условии, что  $P < K$ :

$$\sum_{i=1}^n c_i \cdot s(r_i) + \sum_{i: v_i \in \bigcup_{k=1}^n F(r_k)} d_i \cdot s(v_i) \rightarrow \min_{c_i, d_i \in \{0,1\}}. \quad (5.13)$$

Пусть дана взвешенная гиперсеть с заданной структурой. Определены первичная сеть  $PS$ , вторичная сеть  $WS$  и задано вложение  $F$  первичной сети во вторичную. То есть, на заданной структуре требуется построить оптимальную и живучую гиперсеть так, чтобы была достижима каждая вершина (остовность).

При отказе какого-либо компонента сети (удалении элемента гиперсети) нужно, чтобы связь между вершинами сохранялась. Следовательно, необходим какой-нибудь обходной независимый маршрут, не содержащий удаляемый элемент. Например, для получения 3-связной гиперсети по ребрам, в случае маршрутов, если между любой парой вершин будет хотя бы по 3 независимых по ребрам

маршрута, то при удалении любых двух ребер гиперсети, сеть останется связной и связность ее будет, по крайней мере, равна трем.

Оптимальность может быть достигнута путем проверки ребра на необходимость присутствия. То есть, все ребра упорядочиваются по убыванию, затем, начиная с самого тяжелого ребра, начинается проверка на предмет возможности его удаления без ущерба для живучести. Если да, то в нем нет необходимости и его можно удалить. Таким образом, полученная гиперсеть будет оптимальной.

На основании приведенных выше рассуждений может быть предложен несложный алгоритм. В его основу положен алгоритм Прима-Краскала [196] и метод секущих цепей, предложенный Оре [153, 171]. Речь идет о процедуре поиска минимальной остовной гиперсети с заданной  $K$  – связностью.

Шаг 0: проверяем сеть на интересующую нас  $K$  – связность. Если  $K = P$ , то переходим к шагу 1; если нет, то при  $K < P$  переходим к шагу 4.

Шаг 1:  $i = 1$ . Упорядочиваем все имеющиеся ребра в порядке убывания  $(r_1, r_2, \dots, r_{k-1}, r_k)$ .

Шаг 2: если  $i < k$ , то удаляем ребро  $r_i$  и проверяем наличие  $P$  маршрутов между инцидентными данному ребру вершинами. Если они найдены, то удаляем  $r_i$ ;  $i = i + 1$  и производим шаг 2. В противном случае оставляем  $r_i$ ;  $i = i + 1$  повторяем шаг 2. В противном случае выполняется шаг 3.

Шаг 3: стоп – сеть построена.

Шаг 4: стоп – сеть построить невозможно.

Ключевым моментом в предлагаемом алгоритме является шаг 2. Для его реализации воспользуемся тем фактом, что структура гиперсети полностью определена. Это позволяет упростить задачу путем построения взаимно однозначного отображения между гиперсетью и неким более простым объектом, на котором применим адаптированный метод Оре секущих цепей [153]. Учитывая все вышеизложенное, метод будет заключаться в следующем:

- строится взаимно однозначное отображение между гиперсетью и более простым объектом;



- применяется предложенный алгоритм;
- находится обратное отображение полученных результатов на гиперсеть.

Перед переходом к дальнейшему решению задачи, следует отдельно пояснить понятие независимости. Независимость в гиперсети очень тесно связана, также, как и  $K$  – связанность, со способом удаления элементов сети. Независимость может быть: реберная, по ветвям, по вершинам, по вершинам внешне- и по вершинам внутренне-связным соответственно для четырех типов маршрутов. По аналогии с теорией графов [153, 200] с учетом специфики гиперсетей вводится понятие независимых маршрутов.

Так, при внешнем удалении вершины удаляются транзитные ребра, в то время как инцидентные ребра остаются. Поэтому маршруты независимы вершинно внешне, хотя и пересекаются в одной вершине. Аналогичным образом определяются остальные понятия независимых маршрутов (квазимаршрутов, слабых маршрутов). Если маршрут является относительным, где достижимость вершин осуществляется только наличием маршрута в первичной сети, он определяется так же, как и в теории графов.

Пусть задана  $K = \lambda_v(OV) \cdot (\omega(OX_1))$  – связная гиперсеть  $S = (X, V, R)$ . Как и выше, величины  $s(r_i)$  и  $s(v_i)$  определяют веса ребер и ветвей соответственно. Требуется найти минимальную (по весу) остовную часть гиперсети с требуемой связностью  $P = \lambda_v(OV) \cdot (\omega(OX_1))$  для  $P < K$ .

Для построения взаимно однозначного отображения учтем специфику относительного маршрута. Согласно [166] понятие относительного маршрута в гиперсети совпадает с понятием маршрута в графе  $PS = (X, V)$ . Иными словами, этот маршрут определяется на графе первичной сети гиперсети  $S$ . Следовательно, отображение строится легко. К полученному графу применяем алгоритм, который в чистом виде сводится к алгоритму Прима-Краскала и методу Оре для графов. Полученные результаты переносятся на гиперсеть. Таким образом, задача может быть решена.

Пусть задана  $K = \lambda_r(CR)$  – связная гиперсеть  $S = (X, V, R)$ . Требуется найти минимальную (по весу) остовную часть гиперсети с требуемой связностью  $P = \lambda_r(CR)$  для  $P < K$ . Данная задача полиномиально разрешима [196]. Отображение строится следующим образом: вторичной сети  $WS = (X, R)$  сопоставляется граф, вершинами которого будет множество вершин  $X \cup M$ , где  $M = \bigcup_{i=1}^n M_i$ . В данном случае  $n$  – число ребер, а  $M_i$  – вершины, которые в гиперграфе соответствуют транзитным вершинам ребра. После применения алгоритма, как и в предыдущей задаче, полученные результаты переносятся на гиперсеть. Примеры построения гиперсетей, основанные на использовании предложенного метода, приведены в [118, 119].

Следует подчеркнуть, что ряд задач, решаемых в процессе реализации предлагаемого алгоритма, в общем случае относится к  $NP$  – сложным [42]. С другой стороны, при ограниченном количестве УК, находящихся в границах территории, где произошли разрушающие воздействия, эти задачи становятся полиномиально разрешимыми. В подобных случаях работа алгоритма заметно упрощается.

## 5.5 Результаты исследования с позиций системного анализа

В системном анализе исследуемый объект часто рассматривается с трех точек зрения [204] – функциональной, морфологической и информационной. Исследования, выполненные в диссертационной работе, позволяют дополнить функциональные, морфологические и информационные свойства NGN в условиях ЧС рядом новых научно обоснованных положений, имеющих практическую ценность.

Функциональные свойства сети следующего поколения в ЧС дополняются, в основном, алгоритмами, позволяющими эффективно обслуживать мультисервисный трафик. Подобные алгоритмы позволяют решить следующие задачи:

- обеспечить обмен приоритетным трафиком, имеющим отношение к ликвидации последствий ЧС, с заданными качественными показателями;
- уменьшить трафик в узлах коммутации при возникновении ЧС за счет ограничения длительности разговора и введения пауз между попытками установления соединения;
- повысить эффективность работы Системы-112 за счет введения процедуры сортировки входящих вызовов.

Морфологические свойства сети следующего поколения в ЧС дополняются, чтобы обеспечить повышение надежности работы телекоммуникационной системы в целом. Данная цель достигается за счет проведения таких мероприятий:

- применение аппаратно-программные средства ИШ для повышения надежности и управляемости оборудования передачи и коммутации в составе NGN;
- выявление "узких мест" (фрагментов в линейно-кабельных сооружениях), наличие которых служит потенциальным источником нарушений работоспособности NGN;
- создание запаса источников электропитания, обеспечивающих надежность функционирования оборудования передачи и коммутации заданную при отказах внешнего энергоснабжения.

Информационные свойства сети следующего поколения в условиях ЧС дополняются тремя основными компонентами:

- средствами информационного воздействия (оповещения), позволяющими косвенно управлять процессом снижения трафика, который генерируется пользователями при возникновении масштабной ЧС;
- цепочкой постоянного обмена информацией между основными участниками телекоммуникационного рынка об успешных и ошибочных решениях, связанных с функционированием NGN в условиях ЧС;
- предложением по проведению междисциплинарных исследований, направленных на комплексное решение проблем, которых порождаются последствиями ЧС.

## 5.6 Оценка народно-хозяйственного эффекта от использования результатов проведенных исследований

Для оценки народно-хозяйственного эффекта, возникающего при использовании результатов проведенных исследований, следует выбрать адекватный методологический подход. Он может быть основан на трех ключевых принципах:

- определяется минимальный получаемый эффект, гарантирующий вычисление нижней границы выбранного экономического показателя, в качестве которого уместно взять  $NPV$  – чистую приведенную стоимость [135];
- учитывается, в основном, экономический эффект, обусловленный применением оборудования ИШ (рост доли обслуженного трафика, достигаемый внедрением предложенных алгоритмов, в денежных единицах не оценивается);
- формируется  $NPV$  за счет оценки повышения устойчивости функционирования телекоммуникационной системы, играющей роль одного из важных инструментов по минимизации ущерба от негативных последствий ЧС [258].

В качестве объекта для расчета капитальных вложений была выбрана Московская область, для которой ряд проектов по установке оборудования ИШ уже реализован. Цены на оборудование ИШ предоставлены разработчиком соответствующих аппаратно-программных средств. Для согласования фрагментов ССОП, построенных на разных технологиях коммутации (канальной и пакетной), необходим транспортный шлюз (ТС), стоимость которого для  $i$ -го типа равна  $C_{ТС}(i)$ . Оборудование ИШ разрабатывалось как модификация ТС, которое – в качестве дополнительных функциональных возможностей – выполняет также операции,

свойственные резервному контроллеру сети. При этом стоимость оборудования ИШ  $i$ -го типа возрастает до величины  $C_{ИШ}(i)$ .

Таким образом, капитальные вложения на модернизацию ССОП определяются, в основном, разницей  $C_{ИШ}(i) - C_{ТС}(i)$ . Данное утверждение обусловлено следующими обстоятельствами:

- затраты на проектные работы одинаковы для решений, основанных на применении шлюзов любого вида (транспортные или интеллектуальные);
- инвестиции для развития линейно-кабельных сооружений инвариантны к выбору вида шлюзов;
- стоимость строительно-монтажных работ у выбранного поставщика оборудования не зависит от вида шлюза.

Анализ стоимостных показателей шлюзового оборудования показал, что разница  $C_{ИШ}(i) - C_{ТС}(i)$  не зависит от параметра  $i$ , который определяет, в основном, количество поддерживаемых трактов Е1 со стандартной скоростью 2048 кбит/с. Она составляет примерно 300 тыс. руб. с погрешностью для разных значений параметра  $i$  не более 2%.

В таблице 5.4 приведены оценки, касающиеся капитальных вложений при модернизации ССОП за счет установки оборудования ИШ. Данные по численности населения и количеству муниципальных образований (МО) были взяты из статей, опубликованных в Википедии. При проведении расчетов было сделано следующее допущение: в одном домохозяйстве (дом индивидуальной застройки или отдельная квартира) проживает, в среднем, три человека.

Указанные затраты на модернизацию ССОП позволяют в условиях ЧС получить следующие, весьма важные, народнохозяйственные эффекты:

- повысить надежность функционирования системы управления в субъекте федерации за счет устойчивой связи между всеми ветвями власти;
- обеспечить устойчивое взаимодействие между органами МЧС и экстренными оперативными службами региона, больницами и станциями скорой помощи, транспортными предприятиями, системой гражданской оборо-

ны, системой государственных резервов и другими участниками ликвидации отрицательных последствий ЧС;

- сохранить, как минимум, голосовую связь для оповещения населения и юридических лиц о ЧС, наладить бесперебойное оперативное информирование всех о необходимых действиях в условиях чрезвычайной ситуации в регионе; необходимость решения данной проблемы неоднократно отмечалась в Государственных отчетах МЧС РФ [258].

Таблица 5.4 – Оценка капитальных вложений на модернизацию ССОП

Показатель	Ед. изм.	Величина
Население Московской области	чел.	6700180
Количество муниципальных образований (МО)	шт.	326
Средняя численность населения в МО	чел.	20553
Среднее количество домохозяйств в одном МО	шт.	6851
Цена шлюза на 2000 абонентов с поддержкой функций управления	руб.	300658
Необходимое число шлюзов в среднем на одно МО	шт.	3,43
Стоимость шлюзов с поддержкой функций управления в среднем на одно МО	руб.	1029904
Стоимость проекта и монтажа ИШ на одно МО (10% от стоимости оборудования)	руб.	102990
Стоимость капитальных вложений на одно МО	руб.	1132894
Стоимость капитальных вложений на одно домохозяйство	руб.	165
Стоимость капитальных вложений на жителя	руб.	55
Всего капитальных вложений на дооборудование NGN сети Московской области	руб.	369323567

Указанные затраты на модернизацию ССОП позволяют в условиях ЧС получить следующие, весьма важные, народнохозяйственные эффекты:

- повысить надежность функционирования системы управления в субъекте федерации за счет устойчивой связи между всеми ветвями власти;
- обеспечить устойчивое взаимодействие между органами МЧС и экстренными оперативными службами региона, больницами и станциями скорой помощи, транспортными предприятиями, системой гражданской обороны, системой государственных резервов и другими участниками ликвидации отрицательных последствий ЧС;
- сохранить, как минимум, голосовую связь для оповещения населения и юридических лиц о ЧС, наладить бесперебойное оперативное информирование всех о необходимых действиях в условиях чрезвычайной ситуации в регионе; необходимость решения данной проблемы неоднократно отмечалась в Государственных отчетах МЧС РФ [258].

Виды возникающих рисков и затрат (ущерба) в значительной мере определяются характером ЧС [161] в конкретных условиях ее возникновения. Дать количественную оценку снижения рисков, указанных выше негативных последствий ЧС, можно лишь *апостериори*, то есть после анализа статистики снижения потерь от ЧС за определенный период времени после предлагаемой модернизации ССОП. Важно после каждой ЧС анализировать не только материальные потери и человеческие жертвы, но и работоспособность ССОП как во время ЧС, так и в период ликвидации ее последствий. Такой мониторинг должны выполнять не только работники МЧС, но и Операторы связи. В результате такого анализа можно будет уточнить эффект снижения ущерба и выявить узкие места в телекоммуникационной системе.

В тексте ежегодных Государственных докладов МЧС РФ [258] можно найти динамику материального ущерба с 2012 года по 2017 год и дать прогнозную оценку до 2021 года. Предположим, что положительный вклад от модернизации ССОП за счет использования ИШ по всей стране приведет к снижению материального ущерба примерно на 6%. Эта величина выбрана как минимум из всех

оценок, полученных путем опроса группы экспертов. Очевидно, что положительный эффект будет выше, но в данном случае уместно ориентироваться на эту пессимистическую оценку экономического выигрыша.

В масштабе страны продолжительность инвестиционного периода выбрана равной двум годам (срок модернизации ССОП). Используя методики инвестиционного проектирования [135, 205] и риск-анализа [150], были проведены соответствующие расчеты, результаты которых показаны на рисунке 5.8. Для пролонгации данных на всю страну основные показатели оценивались в расчете на одного жителя РФ. В данном варианте прогнозирования предполагалось, что все необходимые капитальные вложения в модернизацию сети были сделаны в 2012-2013 годах. С 2018 по 2021 год использовались прогнозные значения численности населения и возможного ущерба от ЧС. При расчете чистой приведенной стоимости проекта ставка дисконтирования [135] была выбрана равной 10%.

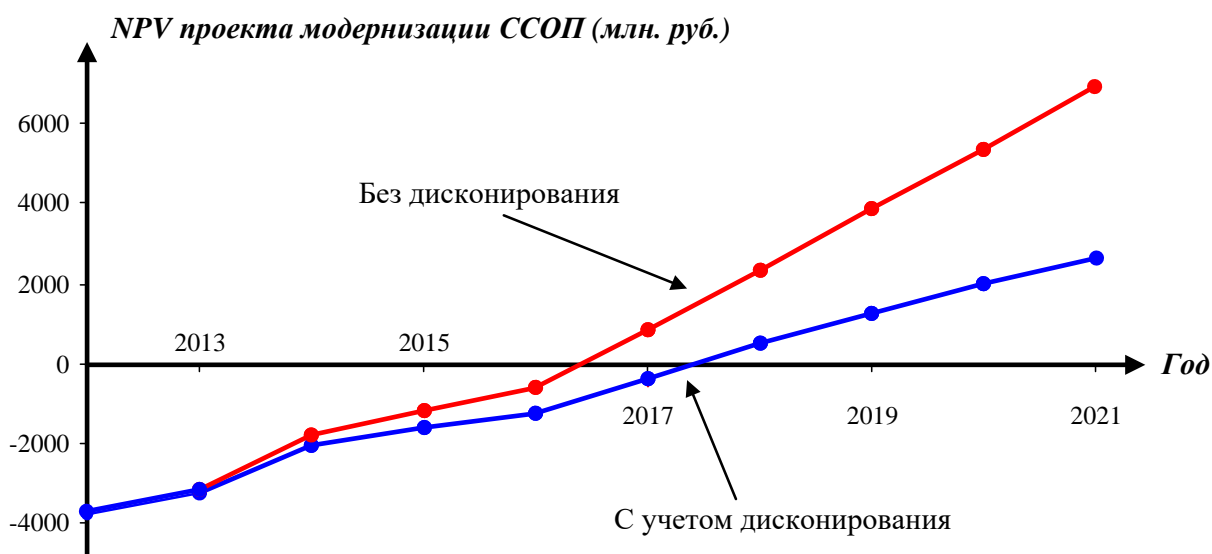


Рисунок 5.8 – Динамика *NPV* проекта модернизации ССОП

Как видно из приведенных кривых *NPV* срок окупаемости проекта модернизации (в момент, когда  $NPV = 0$ ) составляет от 4,5 до 5,5 лет. Если учесть в качестве абонентов и юридические лица, то удельные капитальные расходы при модернизации сети на одного обобщенного абонента будут еще меньше, что дополнительно может снизить срок окупаемости проекта.



Очевидно, что величина разовых вложений в размере 55 руб. на одного жителя (таблица 5.4), связанных с предлагаемой модернизацией ССОП, является вполне приемлемой по сравнению с возможными негативными социально-экономическими последствиями и человеческими жертвами от всевозможных ЧС. При этом минимальный экономический эффект к 2020 году превысит 2 млрд. руб. с учетом дисконтирования (снижения стоимости денег со временем).

### **5.7 Возможные направления дальнейших исследований**

Направления дальнейших исследований, результаты которых будут полезны для улучшения работы NGN в период действия ЧС, определяются тремя основными процессами. Первый процесс стимулируется своего рода "внутренними" алгоритмами функционирования телекоммуникационной системы, позволяющими повысить эффективность обслуживания трафика в тот период, когда ощущаются последствия ЧС. Второй процесс связан с новыми возможностями телекоммуникационной системы, заключающимися в ее эволюционных тенденциях. Третий процесс стимулируется практическим применением NBIC-технологий [66], которые можно считать примерами использования междисциплинарного подхода, упомянутого выше. Аббревиатура NBIC образована из слов Nano (нано технологии), Bio (биологические технологии), Inform (информационные технологии), Cognitive (когнитивные технологии).

Среди примеров, относящихся к первому процессу, следует выделить системы, которые известны как DPI – Deep Packet Inspection [222]. Специалисты используют термин DPI применительно к оборудованию и технологиям, проверяющим содержимое IP-пакетов, что позволяет обоснованно управлять трафиком. При условии массового использования систем DPI можно собрать достоверную информацию о состоянии NGN, что позволит лучше управлять ее ресурсами, а также прогнозировать изменения поступающего трафика.

Еще одним примером первого процесса может считаться исследование, направленное на совершенствование системы управления NGN. Эта задача должна решаться не столько для условий ЧС, сколько для всего периода эксплуатации NGN. Забегая вперед, следует подчеркнуть, что данная проблема напрямую связана со вторым процессом: одним из важнейших направлений эволюции NGN считается создание эффективной системы управления ее ресурсами [6, 229].

С этой точки зрения будут очень актуальны исследования по выравниванию нагрузки на основании метода, предложенного Л.Дж. Валлиантом, и алгоритма Шуурбала. Этим вопросам посвящена статья [211], в которой рассматриваются аспекты функционирования сети класса NGN.

Третий пример первого процесса касается влияния психологических аспектов, характерных для периода ЧС, на генерируемый трафик. Как показывает опыт эксплуатации Системы-112 работа консультантов, владеющих методами общения с людьми, которые попали в стрессовую ситуацию, позволяет заметно снизить количество обращений в экстренные оперативные службы. Это ведет к минимизации роста трафика в период действия ЧС. Данный пример можно считать типичным приложением методов междисциплинарных исследований.

Второй процесс может рассматриваться как следствие проектов GENI, FIND, Future Internet Assembly, Akari Project и им подобных концепций [78]. Эти проекты направлены на формирование следующей генерации NGN и Интернет. К последнему также относится и тактильный Интернет [86]. Основные идеи, заложенные в эти проекты, направлены на улучшение взаимосвязанных показателей – качества обслуживания, скорости обмена информации, надежности, защищенности от несанкционированного доступа. Представляется логичным проведение соответствующих исследований с учетом тех требований, которые характерны для периода действия ЧС. Важная роль отводится применению инновационных решений при разработке телекоммуникационного оборудования [163].

Третий процесс базируется на NBIC-технологиях. По всей видимости, в ближайшее время актуальными будут исследования, направленные на применение когнитивных методов анализа, которые доказали свою эффективность при

изучении сложных и плохо определенных процессов [76, 85, 214]. Интерес к когнитивным методам анализа объясняется невысокой достоверностью усредненных прогнозов для каждой конкретной ЧС по ряду объективных и субъективных причин. Эффективность использования когнитивных технологий будет определяться положительным и отрицательным опытом, накопленным при ликвидации последствий ЧС. Возможность получения соответствующей информации – одна из положительных особенностей NGN.

## 5.8 Выводы по главе 5

1. Основное внимание в диссертационной работе уделяется поведению сети следующего поколения в условиях чрезвычайных ситуаций. Однако, в течение длительного периода времени в составе телекоммуникационной системы будут использоваться технологии коммутации пакетов, принятые для сети следующего поколения, и коммутации каналов, применяемые в телефонных станциях. Сопряжение сетей, использующих разные технологии коммутации, ухудшает показатели качества обслуживания трафика речи, роль которого возрастает в период действия чрезвычайных ситуаций. Это обстоятельство требует разработки комплекса методов ограничения трафика, которые уместно разделить на две большие группы – косвенные и прямые.

2. Косвенные методы ограничения трафика реализуются путем доставки актуальной информации различными средствами, имеющимися в составе телекоммуникационной системы (телевизионное и звуковое вещание, передача коротких и мультимедийных сообщений и другие решения). Получение этой информации, как свидетельствуют результаты обработки экспертных оценок, позволяет в значительной мере снизить количество вызовов, порождающих трафик речи. Обмен информацией, доставляемой используемыми средствами электросвязи, должен отвечать ряду требований, среди которых следует выделить два момента. Во-

первых, информационные сообщения должны формироваться оперативно на основании заранее созданной библиотеки стандартных фраз. Во-вторых, суть информационных сообщений должна выбираться так, чтобы избежать возникновения массовой паники, которая может привести к противоположному эффекту – лавинообразному росту трафика.

3. Прямые методы ограничения трафика, используемые в чрезвычайных ситуациях, применяются в тех случаях, когда косвенные механизмы не позволяют обслуживать вызовы с заданными качественными показателями. Для реализации прямых методов ограничения трафика предложен и обоснован алгоритм, включающий две основные процедуры. Первая процедура подразумевает ограничение времени обмена информацией. Процесс снижения допустимого времени обмена информацией осуществляется постепенно. Нижний порог этого времени определяется как минимально необходимая длительность для получения важных сведений. Вторая процедура вводится в том случае, если ограничение времени обмена информацией не приводит к снижению трафика. Она основана на введении пауз между попытками установления соединений с одного терминала. Для реализации предлагаемого алгоритма получены необходимые аналитические соотношения. Их корректность проверена при помощи имитационной модели.

4. Для анализа связности NGN в результате разрушающих воздействий, обусловленных последствиями чрезвычайной ситуации, разработан алгоритм. Он составлен при помощи модели, представляющей собой гиперсеть. В общем случае для реализации алгоритма следует решить ряд задач, часть которых относится к *NP* – сложным. Для значительной части чрезвычайных ситуаций количество компонентов сети, попавших в область, в границах которой наблюдаются разрушающие воздействия, исчисляется единицами. В подобных случаях процесс анализа связности заметно упрощается.

5. Реализация предложений по модернизации телекоммуникационной системы с учетом требований ЧС позволит обеспечить приемлемое качество обслуживания мультисервисного трафика. Вместе с тем, эти предложения порождают технико-экономический эффект, обусловленный повышением эффективности при

ликвидации отрицательных последствий ЧС. Минимальный уровень экономического эффекта составляет 2 млрд. рублей через семь лет после начала процесса внедрения предложенных решений по модернизации телекоммуникационной системы.

6. Результаты, полученные в процессе проведенных исследований, позволяют утверждать, что их совокупность представляет собой завершенную научную работу. Тем не менее, при проведении исследований всегда возникают новые задачи, которые целесообразно сформулировать для выполнения дальнейших работ. В частности, представляется уместным обратить внимание на три процесса. Первый процесс стимулируется своего рода "внутренними" алгоритмами функционирования телекоммуникационной системы, позволяющими повысить эффективность обслуживания трафика в тот период, когда ощущаются последствия чрезвычайных ситуаций (применение аппаратно-программных средств DPI – глубокого анализа содержимого пакетов, совершенствование системы управления сетью следующего поколения, проведение междисциплинарных исследований, связанных с психологическими аспектами поведения абонентов сетей электросвязи). Второй процесс связан с новыми возможностями телекоммуникационной системы, заключающимися в ее эволюционных тенденциях. Третий процесс стимулируется практическим применением новых трендов развития сложных систем, среди которых особо важными представляются когнитивные технологии.

## Заключение

В соответствии с задачами, поставленными в диссертационной работе, были получены следующие научно обоснованные теоретические и практические результаты:

1. Выполнен анализ процессов модернизации для сети связи общего пользования с точки зрения решения задач, возникающих в ЧС. Выделены потенциальные проблемы, сформировавшиеся исторически и возникающие при переходе к NGN. Эти проблемы касаются двух важнейших аспектов функционирования сети связи: обеспечение установленных показателей качества обслуживания мультисервисного трафика с учетом его характера в ЧС, а также поддержка надежности телекоммуникационной системы.

2. Разработан методологический подход к функционированию NGN в условиях ЧС. Этот подход основан на создании привилегированных условий для обслуживания тех видов трафика, которые особо важны для ликвидации последствий ЧС. При этом вводится новая система приоритетов для передачи и обработки IP-пакетов и, при необходимости, осуществляется реконфигурация сети по заранее разработанным правилам или на основе оперативной информации о состоянии ресурсов передачи, коммутации и обработки информации. Результаты функционирования NGN в ЧС анализируются с целью улучшения выполняемых операций в последующем.

3. Предложен комплекс мер для превентивной подготовки NGN к работе при ЧС различного рода. Эти меры включают организационные и технические мероприятия. Проведенные исследования показали высокую эффективность введения в состав NGN новых аппаратно-программных средств, которые были названы "Интеллектуальным шлюзом". По составленному техническому заданию Интеллектуальный шлюз был разработан и опробован в реальных эксплуатацион-

ных условиях. Полученные результаты доказали эффективность предложенного решения на практике.

4. Разработаны математические модели узла коммутации в составе NGN и маршрута обмена IP пакетами между интерфейсами пользователь-сеть в ЧС в виде систем и сетей массового обслуживания. Установлено, что для мультисервисного трафика в чрезвычайных ситуациях гипотеза о пуассоновском входящем потоке заявок не подтверждается ни теоретическими выкладками, ни результатами измерений. Проведено исследование предложенных математических моделей аналитически и имитационным моделированием. Полученные результаты использованы для выбора способов обслуживания мультисервисного трафика в ЧС.

5. Получены аналитические выражения для оценки качества обслуживания мультисервисного трафика в чрезвычайных ситуациях. Эти результаты позволили уточнить ряд основных соотношений для анализа сложных сетей и систем массового обслуживания с учетом особенности трафика, создаваемого в чрезвычайных ситуациях. Результаты исследования полезны для анализа широкого класса сложных сетей и систем массового обслуживания.

6. Разработан метод для расчета характеристик надежности применительно к NGN в ЧС. Показано, что эффективным инструментом для решения поставленных задач служит математический аппарат теории графов и гиперсетей. Установлено, что значительную часть задач по обеспечению показателей надежности следует решать на этапе разработки проектных решений. Для масштабных чрезвычайных ситуаций предложен метод введения дополнительных ресурсов с целью поддержки максимально достижимых показателей качества обслуживания мультисервисного трафика. Статистические данные об отказах свидетельствуют, что их значительная часть обусловлена прерыванием внешнего энергоснабжения на длительный срок. Для минимизации последствий таких отказов разработана методика расчета запасов средств электропитания, которые должны обеспечить работоспособность узлов коммутации в составе телекоммуникационной системы.

7. Сформулированы научно обоснованные принципы и на их основе рекомендации по учету особенности функционирования NGN в условиях ЧС. Они ка-

саются всего жизненного цикла телекоммуникационной системы, включая формирование концепции модернизации сетей связи, разработку проектных решений, проведение строительно-монтажных работ, эксплуатацию комплекса технических средств, а также восстановление сети (если оно требуется) после ЧС.

8. Разработан комплекс имитационных моделей для проверки аналитических соотношений, полученных при введении некоторых допущений. Имитационное моделирование доказало корректность всех аналитических результатов, приведенных в диссертационной работе. Разработанные модели используются в Макрорегиональном филиале "Центр" ПАО "Ростелеком" для организации эксплуатационных процессов в ЧС. Они также могут быть использованы для проведения исследований сложных систем и сетей массового обслуживания. Сформулированы перспективные задачи, которые могут стать предметом новых исследований в части организации работы телекоммуникационной системы в ЧС и в других нештатных ситуациях.

Таким образом, в результате проведенных в диссертации исследований решена важная народно-хозяйственная задача. Она заключается в разработке новых научно обоснованных принципов функционирования сети связи следующего поколения в чрезвычайных ситуациях. Их реализация позволит не только повысить качество обслуживания трафика в чрезвычайных ситуациях, но и получить экономический эффект не менее 2 млрд. рублей через семь лет после начала процесс внедрения предложенных решений по модернизации телекоммуникационной системы.



### Список принятых сокращений

- АТС – автоматическая телефонная станция
- БС – базовая станция
- ВМ – выносной модуль
- ДДС – дежурно-диспетчерская служба
- ЕДДС – единая дежурно-диспетчерская служба
- ИПС (UNI) – интерфейс пользователь-сеть
- ИШ – интеллектуальный шлюз
- ЛОР – лицо, обосновывающее решение
- ЛПР – лицо, принимающее решение
- МО – муниципальное образование
- МСЭ (ITU) – Международный союз электросвязи
- МСЭ-Т (ITU-T) – сектор стандартизации МСЭ
- МТА – мобильный телефонный аппарат
- МУ – магистральный участок (сети доступа)
- ПК – персональный компьютер
- РАТС – районная АТС
- РМО – рабочее место оператора
- РУ – распределительный участок (сети доступа)
- СДЭ – сеть документальной электросвязи
- СeМО – сеть массового обслуживания
- СМО – система массового обслуживания
- СОРМ – система оперативно-розыскных мероприятий
- ССОП – сеть связи общего пользования
- ТА – телефонный аппарат
- ТВ – телевизор
- ТС – транспортный шлюз

ТфОП – телефонная сеть общего пользования

УАТС – учрежденческая АТС

УВСМ – узел входящего сообщения для междугородной связи

УИС – узел исходящего сообщения

УК – узел коммутации

УОВЭОС – узел обслуживания вызовов экстренных оперативных служб

ФР – функция распределения

ЦОВ – центр обслуживания вызовов

ЧС – чрезвычайная ситуация

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

IP – Internet Protocol (протокол Интернет)

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

IPEP – 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)

MMS – Multimedia Messaging Service (услуги передачи мультимедийных сообщений)

NGN – Next Generation Network (сеть связи следующего поколения)

NPV – Net Present Value (чистая приведенная стоимость)

QoS – Quality of Service (качество обслуживания)

SLA – Service Level Agreement (соглашение об уровне обслуживания)

SMS – Short Message Service (услуги передачи коротких сообщений)

SP – signaling point (пункт сигнализации)

SSW – SoftSwitch (контроллер транспортного шлюза)

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

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

**Список использованных источников**

1. Абаев, П.О. Построение моделей и анализ вероятностных характеристик протокола установления сессий / П.О. Абаев: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: РУДН. – 2011.– 17 с.
2. Акимов, О.Е. Дискретная математика: логика, группы, графы / О.Е. Акимов. – М.: Лаборатория базовых знаний. – 2001. – 376 с.
3. Алиев, Т.И. Основы моделирования дискретных систем / Т.И. Алиев. – СПб.: СПбГУ ИТМО. –2009. – 363 с.
4. Артамонов, В.С. Моделирование чрезвычайных ситуаций на основе сетей Петри / В.С. Артамонов, А.Ю. Иванов. // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2013. – №6. – С. 62-66 с.
5. Аттетков, А.В. Методы оптимизации / А.В. Аттетков, С.В. Галкин, В.С. Зарубин. – М.: МГТУ. – 2001. – 440 с.
6. Бакланов, И.Г. NGN: принципы построения и организации / И.Г. Бакланов. – М.: Эко-Трендз – 2008. – 400 с.
7. Барсегян, А.А. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining / А.А. Барсегян, М.С. Куприянов, В.В. Степаненко, И.И. Холод. – СПб.: БХВ-Петербург. – 2004. – 336 с.
8. Бахарева, Н.Ф. Аппроксимативные методы и модели массового обслуживания. Исследование компьютерных сетей / Н.Ф. Бахарева, В.Н. Тарасов. – Самара: Издательство СНЦ РАН. – 2011. – 327 с.
9. Башарин, Г.П. К анализу задержек в общем канале сигнализации / Г.П. Башарин, В.А. Наумов, К.Е. Самуйлов // Сборник научных трудов ЦНИИС "Квазиэлектронные и электронные системы коммутации". – 1983. – С. 128-137.

10. Башарин, Г.П. Анализ очередей в вычислительных сетях. Теория и методы расчета. / Г.П. Башарин, П.П. Бочаров, А.Я. Коган. – М.: Наука. – 1989. – 336 с.
11. Бейзер, Б. Тестирование черного ящика. Технологии функционального тестирования программного обеспечения и систем / Б. Бейзер. – СПб.: Питер. – 2004. – 318 с.
12. Бесслер, Р. Проектирование сетей связи / Р. Бесслер, А. Дойч. – М.: Радио и связь. – 1988. – 272 с.
13. Блукке, В.П. Исследование имитационной модели живучести интегральной информационной сети / В.П. Блукке, В.К. Попков // Электросвязь. – 2010. – №11. – С.52-56.
14. Боев, Б.В. Прогнозирование процессов массовой паники при техногенных авариях и катастрофах / Б.В. Боев, В.С. Ястребов // Журнал неврологии и психиатрии. – 2009 – №11. – С. 81-88.
15. Большев, Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – М.: Наука. – 1983. – 416 с.
16. Бордман, Б. Переходим на MPLS / Б. Бордман, А. Ахмед // Сети и системы связи. – 2005. – №13. – С. 64-72.
17. Боровков, А.А. Вероятностные процессы в теории массового обслуживания / А.А. Боровков. – М.: Наука. – 1972. – 368 с.
18. Бреганов, А. Система-112 на службе МЧС РФ: новые возможности / А. Бреганов, В. Елагин // Бюллетень "Системы связи, оповещения, автоматизации и безопасности МЧС России". – 2010. – С. 148-149.
19. Вадзинский, Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям / Р.Н. Вадзинский. – СПб.: Наука. – 2001. – 296 с.
20. Вадзинский, Р.Н. Статистические вычисления в среде Excel / Р.Н. Вадзинский. – СПб.: Питер. – 2008. – 608 с.
21. Варакин, Л.Е. Цифровой разрыв в глобальном информационном обществе / Л.Е. Варакин. – М.: Международная Академия Связи. – 2004. – 160 с.

22. Варакин, Л.Е. Интеллектуальная сеть: концепция и архитектура / Л.Е. Варакин, А.Е. Кучерявый, Н.А. Соколов, Ю.И. Филюшин // Электросвязь. – 1992. – № 1. – С. 7-10.
23. Варжапетян, А.Г. Квалиметрия. Учебное пособие / А.Г. Варжапетян. – СПб.: СПбГУАП. – 2005. – 176 с.
24. Вемян, Г.В. Передача речи по сетям электросвязи / Г.В. Вемян. – М.: Радио и связь. – 1985. – 272 с.
25. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Академия. – 2005. – 576 с.
26. Вентцель, Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Высшая школа. – 2000. – 383 с.
27. Вишневский, В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей / В.М. Вишневский. – М.: Техносфера. – 2003. – 512 с.
28. ГОСТ Р 53111-2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. М.: Стандартинформ. – 2009. – 19 с.
29. Гавлиевский, С.Л. Методы анализа мультисервисных сетей связи с несколькими классами обслуживания / С.Л. Гавлиевский: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Самара: ПГУТИ. – 2012. – 32 с.
30. Гадасин, В.А. Надежность крупномасштабных сетей связи с аддитивной структурой / В.А. Гадасин, Д.В. Гадасин // Автоматика и телемеханика. – 1997. – №1. – С. 160-173.
31. Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Либроком. – 2013. – 584 с.
32. Гнеденко, Б.В. Приоритетные системы обслуживания / Б.В. Гнеденко, Э.А. Даниелян, Б.Н. Димитров, Г.П. Климов, В.Ф. Матвеев. – М.: МГУ. – 1973. – 448 с.

33. Гольдштейн, А.Б. Softswitch / А.Б. Гольдштейн, Б.С. Гольдштейн – СПб.: БХВ-Петербург. – 2006. – 368 с.
34. Гольдштейн, Б.С. Перспективы развития "Системы-112" / Б.С. Гольдштейн, М.В. Кабанов, Д.С. Маслов, А.И. Поташов, Н.А. Соколов // Вестник связи. – 2008. – №9. – С. 44-47.
35. Гольдштейн, Б.С. Интерфейсы СОРМ. Справочник по телекоммуникационным протоколам / Б.С. Гольдштейн, Ю.С. Крюков, А.В. Пинчук, И.П. Хегай, В.Э. Шляпоберский. – СПб.: БХВ-Петербург. – 2006. – 159 с.
36. Гольдштейн, Б.С. Сети связи / Б.С. Гольдштейн, Н.А. Соколов, Г.Г. Яновский. – СПб.: БХВ-Петербург. – 2010. – 400 с.
37. Гребенщикова, Е.Г. Трансдисциплинарная парадигма: наука – инновации – общество / Е.Г. Гребенщикова. – М.: "Либроком". – 2011. – 192 с.
38. Гулевич, Д.С. Сети связи следующего поколения / Д.С. Гулевич. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. – 2007. – 184 с.
39. Гуренкова, Т.Н. Психология экстремальных ситуаций / Т.Н. Гуренкова, И.Н. Елисеева, Т.Ю. Кузнецова, О.Л. Макарова, Т.Ю. Матафонова, М.В. Павлова, Ю.С. Шойгу. – М.: Академия. – 2009. – 320 с.
40. Гуров, В.С. Передача дискретной информации и телеграфия / В.С. Гуров, Г.А. Емельянов, Н.Н. Етрухин. – М.: Связь. – 1969. – 559 с.
41. Гусятников, П.Б. Векторная алгебра в примерах и задачах / П.Б. Гусятников, С.В. Резниченко. – М.: Высшая школа. – 1985. – 232 с.
42. Гэри, М. Вычислительные машины и трудноразрешимые задачи / М. Гэри, Д. Джонсон. – М.: Мир. – 1982. – 416 с.
43. Давыдов, Г.Б. Сети электросвязи / Г.Б. Давыдов, В.Н. Рогинский, А.Я. Толчан. – М.: Связь. – 1977. – 360 с.
44. Деч, Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования / Г. Деч. – М.: Наука. – 1971. – 288 с.
45. Джейсуол, Н. Очереди с приоритетами / Н. Джейсуол. – М.: Мир. – 1973. – 278 с.

- 46.Дженстер, П. Анализ сильных и слабых сторон компании. Определение стратегических возможностей / П. Дженстер, Д. Хасси. – М.: Вильямс. – 2003. – 368 с.
- 47.Диткин, В.А. Интегральные преобразования и операционное исчисление / В.А. Диткин, А.П. Прудников. – М.: Наука. – 1974. – 544 с.
- 48.Дубровский, Е.П. Канализационно-кабельные сооружения связи / Е.П. Дубровский. – М.: Высшая школа. – 1991. – 320 с.
- 49.Дудин, А.Н. Оптимальное гистерезисное управление ненадежной системой ВМАР/SM/1 с двумя режимами работы / А.Н. Дудин // Автоматика и телемеханика. – 2002. – №10. – С. 58-72.
- 50.Дудник, Б.Я. Надежность и живучесть систем связи / Б.Я. Дудник, В.Ф. Овчаренко, В.К. Орлов, Б.П. Филин, А.В. Холин, А.В. Шурмин. – Радио и связь. – 1984. – 216 с.
- 51.Дымарский, Я.С. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи / Я.С. Дымарский, Н.П. Крутякова, Г.Г. Яновский. – М.: Мобильные коммуникации. – 2003. – 384 с.
- 52.Епихин, В.В. Оценка числа деревьев графа / В.В. Епихин // Сборник "Методы теории телетрафика в системах распределения информации". – М.: Наука. – 1975. – С. 157-163.
- 53.Епихин, В.В. К вопросу о построении оптимальных графов / В.В. Епихин, А.Д. Харкевич. Сборник "Методы теории телетрафика в системах распределения информации". – М.: Наука. – 1975. – С. 146-157.
- 54.Ехриель, И. Безопасность и фрод-контроль в сетях NGN/IMS. Часть I.– / И. Ехриель, Э. Баженов, Колесник // ИКС. – 2012. – № 1 – 2. – С. 64-66.
- 55.Ехриель, И. Безопасность и фрод-контроль в сетях NGN/IMS. Часть II.– / И. Ехриель, Э. Баженов, Колесник // ИКС. – 2012. – № 3. – С. 64-66.
- 56.Жданов, И.М. Построение городских телефонных сетей / И.М. Жданов, Е.И. Кучерявый. – М.: Связь. – 1972. – 136 с.
- 57.Журкин, И.Г. Геоинформационные системы / И.Г. Журкин, С.В. Шайтура. – М.: Кудиц-Пресс. – 2009. – 272 с.

- 58.Завалов, О.А. Современные винтокрылые беспилотные летательные аппараты / О.А. Завалов, А.Д. Маслов. – М.: МАИ-Принт. – 2008. – 196 с.
- 59.Запечников, С.В. Информационная безопасность открытых систем. Том 1: Угрозы, уязвимости, атаки и подходы к защите / С.В. Запечников, Н.Г. Милославская, А.И. Толстой, Д.В. Ушаков. – М.: Горячая Линия – Телеком. – 2006. – 536 с.
- 60.Запечников, С.В. Информационная безопасность открытых систем. Том 2: Средства защиты в сетях / С.В. Запечников, Н.Г. Милославская, А.И. Толстой, Д.В. Ушаков. – М.: Горячая Линия – Телеком. – 2008. – 560 с.
- 61.Захаров, Г.П. Службы и архитектура широкополосных цифровых сетей интегрального обслуживания / Г.П. Захаров, М.В. Симонов, Г.Г. Яновский. – М.: Эко-Трендз. – 1993. – 102 с.
- 62.Зверев, Г.Я. Оценка надежности изделия в процессе эксплуатации / Г.Я. Зверев. – М.: Ленанд. – 2010. – 94 с.
- 63.Звуковое вещание. Справочник / под ред. Ю.А. Ковалгина. – М.: Радио и связь. – 1993. – 464 с.
- 64.Звягинцев, М.В. Выбор структуры сети связи с учетом жизненного цикла ее элементов / М.В. Звягинцев, Д.С. Маслов, Н.А. Соколов // Электросвязь. – 2010. – №8. – С. 33-36.
- 65.Иванов, Б.С. Жизнь человека и аксиома опасности / Б.С. Иванов. – М.: МГИУ. – 2010. – 355 с.
- 66.Казанцев, А.К. NBIC-технологии. Инновационная цивилизация XXI века / А.К. Казанцев, В.Н. Киселев, Д.А. Рубвальтер, О.В. Руденский. – М.: ИНФРА-М. – 2012. – 384 с.
- 67.Карпов, Ю. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю. Карпов. – СПб.: БХВ-Петербург. – 2005. – 400 с.
- 68.Кендалл, М. Геометрические вероятности / М. Кендалл, П. Моран. – М.: Наука. – 1972. – 192 с.



- 69.Клейнрок, Л. Вычислительные системы с очередями / Л. Клейнрок. – М.: Мир. – 1979. – 600 с.
- 70.Клейнрок, Л. Теория массового обслуживания. / Л. Клейнрок. – М.: Машиностроение. – 1979. – 432 с.
- 71.Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика / А.И. Кобзарь. – М.: Физматлит. – 2006. – 816 с.
- 72.Кожанов, Ю.Ф. Интерфейсы и протоколы сетей следующего поколения / Ю.Ф. Кожанов. – СПб.: Альфарет. – 2006. – 218 с.
- 73.Козлов, Б.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики / Б.А. Козлов, И.А. Ушаков. – М.: Советское Радио. – 1975. – 472 с.
- 74.Комашинский, В.И. Стратегические аспекты модернизации сетей электросвязи / В.И. Комашинский, А.И. Осадчий, Н.А. Соколов // Вестник связи. – 2012. – №4. – С. 69-72.
- 75.Комашинский, В.И. Аспекты эволюции инфокоммуникационной системы/ В.И. Комашинский, А.И. Осадчий, Н.А. Соколов // Техника связи. – 2012. – №2. – С. 2-9.
- 76.Комашинский, В.И.. Когнитивные системы и телекоммуникационные сети / В.И. Комашинский, Н.А. Соколов // Вестник связи. – 2011. – №10. – С. 4-8.
- 77.Комашинский, В.И. Концепция 2Э: новый подход к модернизации системы сельской связи / В.И. Комашинский, Н.А. Соколов // Connect! Мир связи. – 2011. – №9. – С. 78-81.
- 78.Конвергенция мобильных и стационарных сетей следующего поколения / под редакцией К. Инъевски. – М.: Техносфера. – 2012. – 808 с.
- 79.Корнышев, Ю.Н. Теория телетрафика / Ю.Н. Корнышев, А.П. Пшеничников, А.Д. Харкевич. – М.: Радио и Связь. – 1996. – 272 с.
- 80.Королев, В.Ю. Математические основы теории риска / В.Ю. Королев, В.Е. Бенинг, С.Я. Шоргин. – М.: Физматлит. – 2011. – 620 с.

- 81.Костин, А.А. Проектирование системы централизованного управления ССОП России в чрезвычайных ситуациях / А.А. Костин // Электросвязь. – 2013. – №3. – С. 41-46.
- 82.Кочкаров, А.А. Управление безопасностью и стойкостью сложных систем в условиях внешних воздействий / А.А. Кочкаров, Г.Г. Малинецкий // Проблемы управления. – 2005. – №5. – С. 70-76.
- 83.Крамер, Г. Математические методы статистики / Г. Крамер. – М.: Мир. – 1975. – 648 с.
- 84.Крылов, В.В. Теория телетрафика и ее приложения / В.В. Крылов, С.С. Самохвалова. – СПб.: БХВ-Петербург. – 2005. – 288 с.
- 85.Кулинич А.А. Методология когнитивного моделирования сложных плохо определенных ситуаций / Кулинич А.А // Избранные труды второй международной конференция по проблемам управления. – М.: ИПУ РАН. – 2003, – С. 219-227.
- 86.Кучерявый, А.Е. Перспективные направления исследований в области сетей связи / А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2017. – №2. – С. 8.
- 87.Кучерявый, Е.А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет / Е.А. Кучерявый. – СПб.: Наука и техника. – 2004. – 336 с.
- 88.Лапатин, И.Л. Асимптотическое свойство выходящих потоков систем массового обслуживания с неограниченным числом приборов и входящим МАР-поток / Лапатин И.Л., Назаров А.А. // Автоматика и телемеханика. – 2012. – №5. – С. 57-70.
- 89.Ларичев, О.И. Теория и методы принятия решений / О.И. Ларичев. – М.: Логос. – 2002. – 392 с.
- 90.Леваков, А.К. Особенности функционирования сети следующего поколения в чрезвычайных ситуациях / А.К. Леваков. – М.: ИРИАС. – 2012. – 108 с.
- 91.Леваков, А.К. Анализ структур региональных сетей ДЭС, их классификация и типовые структурные модели / А.К. Леваков, С.Т. Малиновский // Труды Московского технического университета связи и информатики. Сборник статей. – М.: 2004. – С. 152-164.

92. Леваков, А.К. Синтез структур региональных сетей документальной электросвязи, отвечающих требованиям условий чрезвычайных ситуаций / А.К. Леваков // Вестник связи. – 2005. – № 9. – С. 46-51.
93. Леваков, А.К. Оценка устойчивости типовых структур РСДЭС при возникновении ЧС / А.К. Леваков, С.Т. Малиновский, И.С. Синева // Труды Московского технического университета связи и информатики. Сборник статей. – М.: 2005. – С. 50-61.
94. Леваков, А.К. Анализ трафика РСДЭС в условиях ЧС / А.К. Леваков, С.Т. Малиновский, И.С. Синева // Труды Московского технического университета связи и информатики. Сборник статей. – М.: 2005, с. 62-73.
95. Леваков, А.К. Исследование и разработка структур региональных сетей документальной информации для условий чрезвычайных ситуаций / А.К. Леваков: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: МТУСИ. – 2005. – 19 с.
96. Леваков, А.К. Особенности создания и функционирования сетей связи нового поколения / А.К. Леваков // Фотон-Экспресс. – 2006. – № 5. – С. 44-45.
97. Леваков, А.К. Варианты повышения надежности сетей доступа / М.В. Звягинцев, А.К. Леваков, Н.А. Соколов // Вестник связи. – 2011. – №7. – С. 26-30.
98. Леваков, А.К. Задачи по обеспечению функционирования сети NGN при возникновении чрезвычайных ситуаций / А.К. Леваков // Вестник связи. – 2011. – №12. – С. 36-38.
99. Леваков, А.К. Обеспечение устойчивости функционирования ССОП за счет использования интеллектуальных шлюзов / А.К. Леваков // Вестник связи. – 2011. – №9. – С. 9-12.
100. Леваков, А.К. Доступ к центру обработки вызовов номера "112" / Б.С. Гольдштейн, А.К. Леваков, Н.А. Соколов // Вестник связи. – 2012. – №1. – С. 5-8.

101. Леваков, А.К. Приближенный анализ характеристик сети NGN при существенном росте трафика / А.К. Леваков // Электросвязь. – 2011. – №12. – С. 18-20.
102. Леваков, А.К. Имитационная модель для анализа сети NGN при существенном росте трафика / А.К. Леваков // Электросвязь. – 2012. – №4. – С. 20-21.
103. Леваков, А.К. Особенности трафика, обслуживаемого сетями связи в ходе "Прямой линии" с руководителями государства / А.К. Леваков // Вестник связи. – 2012. – №5. – С. 35-37.
104. Леваков, А.К. Оценка параметров трафика сети следующего поколения в ЧС / А.К. Леваков // Вестник связи. – 2012. – №7. – С. 21-25.
105. Леваков, А.К. Результаты моделирования работы сети NGN при существенном росте трафика. Часть I / А.К. Леваков // Электросвязь. – 2012. – №7. – С. 32-34.
106. Леваков, А.К. Результаты моделирования работы сети NGN при существенном росте трафика. Часть II / А.К. Леваков // Электросвязь. – 2012. – №8. – С. 24-25.
107. Леваков, А.К. Метод ограничения резко растущей нагрузки в "Системе-112" / М.В. Кабанов, А.К. Леваков, Н.А. Соколов // Вестник связи. – 2012. – №8. – С. 23-25.
108. Леваков, А.К. Характеристики сети электросвязи при перегрузке одного из узлов коммутации / А.К. Леваков // Электросвязь. – 2012. – №11. – С. 25-27.
109. Леваков, А.К. Характеристики потока IP-пакетов на выходе узлов коммутации в сети следующего поколения / А.К. Леваков // Электросвязь. – 2012. – №12. – С. 14-15.
110. Леваков, А.К. Сортировка вызовов при растущей нагрузке в "Системе-112" ЧС / А.К. Леваков // Вестник связи. – 2013. – №1. – С. 26-29.

111. Леваков, А.К. Свойства потока IP-пакетов на входе транзитных узлов коммутации в сети следующего поколения / А.К. Леваков // Электросвязь. – 2013. – №1. – С. 43-45.
112. Леваков, А.К. Аспекты превентивной подготовки сети связи к работе после возникновения чрезвычайной ситуации. Часть I / А.К. Леваков // Электросвязь. – 2013. – №4. – С. 42-44.
113. Леваков, А.К. Аспекты превентивной подготовки сети связи к работе после возникновения чрезвычайной ситуации. Часть II / А.К. Леваков // Электросвязь. – 2013. – №5. – С. 12-14.
114. Леваков, А.К., Соколов Н.А. Особенности модернизации сетей доступа, созданных операторами телефонной связи / А.К. Леваков // Вестник связи. – 2013. – №6. – С. 41-44.
115. Леваков, А.К. Косвенные механизмы снижения лавинообразного трафика, возникающего в чрезвычайных ситуациях / А.К. Леваков // Вестник связи. – 2013. – №7. – С. 2-4.
116. Леваков, А.К. Формирование информационных сообщений, передаваемых в ЧС / А.К. Леваков // Вестник связи, 2013, №8, с. 14-16.
117. Леваков, А.К. Два метода управления трафиком речи в чрезвычайных ситуациях / А.К. Леваков // Вестник связи. – 2013. – №12. – С. 29-31.
118. Леваков, А.К. О задачах устойчивости сети следующего поколения в чрезвычайных ситуациях / А.К. Леваков, В.К. Попков, Г.В. Попков // Телекоммуникации – 2013. – №12. – С. 40-45.
119. Леваков, А.К. Задачи оптимизации структурной надежности и живучести сетей связи в условиях ЧС / А.К. Леваков, Г.В. Попков // Вестник Бурятского государственного университета. Математика, информатика. – 2014. – №2. – С. 75-87.
120. Леваков, А.К. Задачи формирования комплекса резервных технических средств для восстановления отказов в сети электросвязи вследствие чрезвычайных ситуаций / А.К. Леваков // Электросвязь. – 2013. – №12 – С. 38-40.

121. Леваков, А.К. Некоторые структурно-сетевые решения построения сетей местной и зонавой телефонной связи с технологией NGN в Московской области / А.К. Леваков // 6-я Ежегодная международная конференция "NGN в России. Технологии и услуги". – СПб.: 2007. – 7 с.
122. Леваков, А.К. Задачи управления лавинообразным трафиком при возникновении чрезвычайных ситуаций / А.К. Леваков // 8-ая международная конференция "Управление сетями электросвязи". – М.: 2012. – 10 с.
123. Леваков, А.К. Особенности обслуживания трафика в период чрезвычайных ситуаций / А.К. Леваков // I-я Международная научно-техническая и научно-методическая конференция "Актуальные проблемы инфокоммуникаций в науке и образовании". – СПбГУТ. – 2012. – С. 183-184.
124. Леваков, А.К. Принципы ограничения трафика, обслуживаемого сетью электросвязи в чрезвычайных ситуациях / А.К. Леваков // II-я Международная научно-техническая и научно-методическая конференция "Актуальные проблемы инфокоммуникаций в науке и образовании". – СПбГУТ. – 2013. – 3 с.
125. Леваков, А.К. Процессы совместного функционирования сетей электросвязи и информационных систем в современной службе спасения / А.К. Леваков // Международный семинар МСЭ "Co-evolution of Info communication Technologies and Society, or Ways to the Society without Frontiers". – СПбГУТ. – 2013. – 25 с.
126. Леваков, А.К. Новые задачи обслуживания трафика в чрезвычайных ситуациях / А.К. Леваков // Электросвязь. – 2014. – №4. – С. 27-29.
127. Леваков, А.К. Система обработки информации о чрезвычайных ситуациях / М.В. Кабанов, А.К. Леваков, Н.А. Соколов // Патент на полезную модель № 130110 Российской Федерации №2012155812; заявлен 18.12.2012, опубликован 10.07.2013. – Бюллетень. № 19. – 2 с.
128. Леваков, А.К. Оценка методов снижения телефонного трафика, порождаемого реакцией абонентов на событие / А.К. Леваков, М.В. Кабанов, Н.В. Пинчук, Н.А Соколов // Вестник связи. – 2015. – №2. – С. 12–15.

129. Леваков, А.К. Задачи оценки показателей, определяющих качество функционирования телекоммуникационных сетей / А.К. Леваков, А.В. Федоров, Н.А. Соколов // Электросвязь. – 2015. – №6. – С. 24–27.
130. Леваков, А.К. Несколько слов об абонентских кабелях / А.К. Леваков, И.Ш. Арифиллин // Вестник связи. – 2016. – №11. – с. 18-19.
131. Леваков, А.К., Влияние характера входящего потока IP-пакетов на допустимую загрузку узла коммутации / А.К. Леваков, Н.А. Соколов, А.В. Федоров // Труды ЦНИИС (Санкт-Петербургский филиал). – 2016. – Том 2. – с. 21-25.
132. Леваков, А.К. Характер входящего потока IP-пакетов в условиях чрезвычайных ситуаций / А.К. Леваков // Вестник связи. – 2017. – №11. – с. 4-7.
133. Лившиц, Б.С. Теория телетрафика / Б.С. Лившиц, А.П. Пшеничников, А.Д. Харкевич. – М.: Связь. – 1979. – 224 с.
134. Линдгрэн, М. Сценарное планирование. Связь между будущим и стратегией / М. Линдгрэн, Х. Бандхольд. – М.: Олимп-Бизнес. – 2009. – 256 с.
135. Лифиц, И.М. Теория и практика оценки конкурентоспособности товаров и услуг / И.М. Лифиц. – М.: Юрайт-М. – 2005. – 224 с.
136. Лутов, М.Ф. Квазиэлектронные и электронные АТС / М.Ф. Лутов, М.А. Жарков, П.А. Юнаков. – М.: Радио и связь. – 1988. – 264 с.
137. Макеев, С.А. Сравнительный анализ внутренних протоколов маршрутизации в IP-стеке / С.А. Макеев. – СПб: ИТМО. – 2002. – 182 с.
138. Маликов, Р.Ф. Основы математического моделирования / Р.Ф. Маликов. – М.: Горячая линия – Телеком. – 2010. – 368 с.
139. Маслоу, А.Г. Мотивация и личность / А.Г. Маслоу. – СПб.: Евразия. – 2001. – 478 с.
140. Математическая энциклопедия. Том 3 / под ред. И.М. Виноградова – М.: Советская энциклопедия. – 1977. – 1184 с.
141. Междисциплинарность в науках и философии / под ред. И.Т. Касавина. – М.: – ИФРАН. 2010. – 208 с.

142. Миков, А.С. Анализ трафика при проведении "Горячей линии" Президента Российской Федерации / А.С. Миков // Электросвязь. – 2004. – №8. – С. 21-23.
143. Москвитин, В.Д. Построение и функционирование сетей верхнего уровня ЕСЭ РФ в условиях многооператорской среды / В.Д. Москвитин // Инфоком. Труды МАС. – 2005. – №1. С. 57-64.
144. Мышкис, А.Д. Элементы теории математических моделей / А.Д. Мышкис. – М.: Книжный дом "Либриком". – 2011. – 192 с.
145. Назаретян, А.П. Психология стихийного массового поведения. Лекции / А.П. Назаретян. – М.: Пер Сэ. – 2001. – 112 с.
146. Назаров, А.Н. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения / А.Н. Назаров, К.И. Сычев. – Красноярск: Поликом. – 2010. – 389 с.
147. Нетес, В.А. Надежность сетей связи в период перехода к NGN / В.А. Нетес // Вестник связи. – 2007. – №9. – С. 126-130.
148. Нетес, В.А. Расчет средней наработки на отказ сложных систем на основе логико-вероятностного метода / В.А. Нетес // Автоматика и телемеханика. – 1993. – №10. – С. 185-189.
149. Нетес, В.А. Расчет коэффициента оперативной готовности систем с сетевой структурой / В.А. Нетес, Б.П. Филин // Автоматика и телемеханика. – 1992. – №9. – С. 179-186.
150. Новоселов, А.А. Математическое моделирование финансовых рисков. Теория измерений / А.А. Новоселов. – Новосибирск: Наука. – 2001. – 99 с.
151. Новосельцев, В.И. Теоретические основы системного анализа / В.И. Новосельцев, Б.В. Тарасов. – М.: Майор. – 2013. – 536 с.
152. Олифер, В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. Издание 4-ое / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – СПб.: Питер. – 2010. – 944 с.
153. Оре, О. Графы и их применение / О. Оре. – М.: КомКнига. – 2006. – 168 с.



154. Орлов, А.И. Организационно-экономическое моделирование. Часть 2: Экспертные оценки / А.И. Орлов. – М.: МГТУ. – 2011. – 486 с.
155. Орлов, А.И. Эконометрика / А.И. Орлов. – М.: Экзамен. – 2002. – 576 с.
156. Основные положения развития Взаимоувязанной сети связи Российской Федерации на перспективу до 2005 года. Книга 3 "Основные положения развития телефонной сети общего пользования". – М.: Государственная комиссия по электросвязи при Министерстве связи Российской Федерации. – 1996. – 134 с.
157. Острейковский, В.А. Теория надежности / В.А. Острейковский. – М.: Высшая школа. – 2008. – 464 с.
158. О Концепции создания системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб через единый номер 112 на базе единых дежурно-диспетчерских служб муниципальных образований. – Распоряжение Правительства Российской Федерации №1240-р от 25 августа 2008 года.
159. О внесении изменений в Федеральный закон "О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера". – Федеральный закон №23-ФЗ от 1 апреля 2012 года.
160. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. – Федеральный закон №68-ФЗ от 21 декабря 1994 года.
161. О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. – Постановление Правительства Российской Федерации №304 от 21 мая 2007 года.
162. О совершенствовании системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб на территории РФ. – Указ Президента Российской Федерации №1632 от 28 декабря 2010 года.
163. Пинчук, А.В. Опыт формирования инновационных решений при разработке телекоммуникационного оборудования / А.В. Пинчук, Н.А. Соколов // Вестник связи. – 2017. – №2. – С. 3-8.

164. Положение о приоритетном использовании, а также приостановлении или ограничении использования любых сетей связи и средств связи во время чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. – Постановление Правительства Российской Федерации №895 от 31 декабря 2004 года.
165. Попков, В.К. Математические модели живучести сетей связи / В.К. Попков. – Новосибирск: СО АН СССР. – 1990. – 235 с.
166. Попков, В.К. Математические модели связности / В.К. Попков. – Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН. – 2006. – 490 с.
167. Попков, В.К. Применение теории S-гиперсетей для моделирования систем связи сетевой структуры / В.К. Попков // Проблемы информатики. – 2010. – №4. – С. 17-23.
168. Попков, В.К. Математические основы моделирования сетей связи / В.К. Попков, Г.В. Попков, В.В. Величко. – М.: Горячая линия – Телеком. – 2012. – 183 с.
169. Попков, В.К. Об одной задаче синтеза сетей электросвязи в горных условиях / В.К. Попков, Г.Ы. Токтошов // Проблемы информатики. – 2009. – №4. – С. 15-32.
170. Попков, Г.В. Задача построения виртуальной сети циркулярной связи устойчивой к внешним разрушающим воздействиям / Г.В. Попков – Доклад на Российской научно-технической конференции "Информатика и проблемы телекоммуникаций". – Новосибирск, 2011. – 21–22 апреля, 7 с.
171. Попков, Г.В. О задаче поиска мест расположения узлов для сетей связи при чрезвычайных ситуациях / Г.В. Попков // Вестник Бурятского государственного университета. – 2011. – выпуск № 9. – С. 108-112.
172. Пригожин, И. Человек перед лицом неопределенности / И. Пригожин. – М.: Институт компьютерных исследований. – 2003. – 303 с.
173. Райгородский, А.М. Модели случайных графов / А.М. Райгородский. – М.: МЦНМО. – 2011. – 136 с.

174. Ромашкова, О.Н. Анализ моделей и методов для оценки живучести инфокоммуникационных сетей в условиях чрезвычайных ситуаций / О.Н. Ромашкова, Р.И. Яковлев // Т-Comm "Телекоммуникации и транспорт". – 2012. – №7. – С.165-170.
175. Руководящий документ по общегосударственной системе телеграфной связи. – М.: Межведомственный координационный Совет при Министерстве связи СССР. – 1981. – 55 с.
176. Рыжиков, Ю.И. Теория очередей и управление запасами / Ю.И. Рыжиков. – СПб.: Питер. – 2001. – 384 с.
177. Рыков, В.В. Управляемые системы обслуживания. / В.В. Рыков // Теория вероятностей. Математическая статистика. Техническая кибернетика (Итоги науки и техники). – М.: ВИНТИ. – 1975. – С. 43-153.
178. Саати, Т.Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения / Т.Л. Саати. – М.: Либроком. – 2010. – 520 с.
179. Самарский, А.А. Численные методы / А.А. Самарский, А.В. Гулин. – М.: Наука. – 1989. – 432 с.
180. Сети следующего поколения NGN / под ред. А.В. Рослякова. – М.: Эко-Трендз. – 2008. – 424 с.
181. Сигел, Э. Практическая бизнес-статистика / Э. Сигел. – М.: Вильямс. – 2002. – 1056 с.
182. Симонина, О.А. Модели расчета показателей QoS в сетях следующего поколения / О.А. Симонина: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – СПб.: Государственный университет телекоммуникаций. – 2005. – 16 с.
183. Сифоров, В.И. Развитие теории телетрафика в Советском Союзе / В.И. Сифоров, Г.П. Башарин, Б.С. Лившиц, В.И. Нейман, А.Д. Харкевич, М.А. Шнепс // В кн. "Модели информационных сетей и коммутационных схем". – М.: Наука. – 1982. – С. 149-161.
184. Смолянский, М.Е. Проектирование линейных сооружений ГТС / М.Е. Смолянский. – М.: Радио и связь. – 1989. – 176 с.

185. Соколов, А.Н. Методы анализа задержек IP-пакетов в сети следующего поколения / А.Н. Соколов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – СПб: Государственный университет телекоммуникаций. – 2011. – 20 с.
186. Соколов, А.Н. Оценка параметров задержки пакетов высшего приоритета в IP-сетях / А.Н. Соколов // Электросвязь. – 2011. – № 5. – С. 21-24.
187. Соколов, Н.А. Задачи планирования сетей электросвязи / Н.А. Соколов. – СПб.: Техника связи. – 2012. – 432 с.
188. Соколов, Н.А. Создание сетей электросвязи специального назначения за счет рационального использования процессов консолидации. / Н.А. Соколов, А.В. Ермаков // International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – №2. – PP. 10-14.
189. Соколов, Н.А. Тарифы на услуги связи и пирамида потребностей. / Н.А. Соколов // Инфоком. Труды МАС. – 2004. – №2. – С. 18-20.
190. Сомов, А.М. Спутниковые системы связи / А.М. Сомов, С.Ф. Корнев. – М.: Горячая Линия – Телеком. – 2012. – 244 с.
191. Степанов, С.Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей / С.Н. Степанов. – М.: Эко-Трендз. – 2010. – 392 с.
192. Сычев, Я.В. Опасности техногенных катастроф современности / Я.В. Сычев // Интернет журнал "Технологии техносферной безопасности". – 2012. – №1 (41). – 9 с.
193. Тарасенко, Ф.П. Прикладной системный анализ / Ф.П. Тарасенко. – М.: КноРус. – 2010. – 224 с.
194. Тоценко, В. Проблемы надежности сетей / В. Тоценко // Компьютерра. – 1998. – №14. – С. 713.
195. Тютин, Н.Н. Методы расчета структурной надежности многоцелевых территориальных мультисервисных систем связи / Н.Н. Тютин, И.М. Успенский, С.М. Чудинов, О.Н. Кривошеев // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика,. – 2009. – Том 1. – №9. – С. 60-68.

196. Уилсон, Р. Введение в теорию графов / Р. Уилсон. – М.: Мир. – 1977. – 208 с.
197. Указ Президента Российской Федерации №1522 от 13 ноября 2012 года "О создании комплексной системы экстренного оповещения об угрозе возникновения или о возникновении чрезвычайных ситуаций".
198. Фаерберг, О.И. Качество услуг связи / О.И. Фаерберг, В.О. Шварцман. – М.: ИРИАС. – 2005. – 152 с.
199. Федодеев, Д. Алгоритмы управления очередями / Д. Федодеев // Журнал сетевых решений / LAN. – 2007. – №12. – С. 26-31.
200. Харари, Ф. Теория графов / Ф. Харари. – М.: Эдиториал УРСС. – 2003. – 296 с.
201. Харкевич, А.А. О ценности информации / А.А. Харкевич // Проблемы кибернетики. – 1960. – Выпуск № 4. – С. 53-57.
202. Хинчин, А.Я., Работы по математической теории массового обслуживания / А.Я Хинчин. – М.: Либроком. – 2010. – 240 с.
203. Чернушевич, А.В. Влияние гистерезиса управления трафиком на использование ресурса узла беспроводных систем передачи информации / А.В Чернушевич: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: МТУСИ. – 2012. – 19 с.
204. Черняк, Ю.И. Системный анализ в управлении экономикой / Ю.И. Черняк. – М.: Экономика. – 1975. – 193 с.
205. Четыркин, Е.М. Финансовая математика / Е.М. Четыркин. – М.: Дело. – 2008. – 400 с.
206. Шелухин, О.И. Фрактальные процессы в телекоммуникациях / О.И. Шелухин, А.М. Тенякшев, А.В. Осин. – М.: Радиотехника. – 2003. – 480 с.
207. Ширяев, В.И. Принятие решений: Математические основы. Статические задачи / В.И. Ширяев, Е.В. Ширяев. – М.: Либриком. – 2009. – 208 с.
208. Шмалько, А.В. Цифровые сети связи: основы планирования и построения / А.В. Шмалько. – М.: Эко-Трендз. – 2001. – 282 с.

209. Шнепс, М.А. Системы распределения информации. Методы расчета: Справочное пособие / М.А. Шнепс. – М.: Связь – 1979. – 344 с.
210. Штойян, Д. Качественные свойства и оценки стохастических моделей / Д. Штойян. – М.: Мир. – 1979. – 268 с.
211. Шувалов, В.П. Методика обеспечения отказоустойчивости в мультисервисных сетях связи / В.П. Шувалов, И.Ю. Селянина. // Проблемы информатики. – 2012. – №2. – С. 55-62.
212. Alanen O. Quality of Service for Triple Play Services in Heterogeneous Networks. – Dissertation manuscript, University Jyvaskyla (Finland), 2007, 88 p.
213. Allen O.A. Queueing models of computer systems. – Computer. – 1980. – Vol. 13. – №4. – PP. 13-24.
214. Axelrod R. The Structure of Decision: Cognitive Maps of Political Elites. – Princeton: University Press. – 1976. – 404 p.
215. Blackmore P. Intranets: a Guide to their Design, Implementation and Management. – London, Aslib-IMI. – 2010. – 180 p.
216. Blake J.T., Trivedi S.T. Reliability Analysis of Interconnection Networks Using Hierarchical Composition // IEEE Transaction on Reliability. – 1989. – Vol. 38. – № 1. PP. 111-119.
217. Bolch G., Greiner S., de Meer H., Trivedi K.S. Queueing Networks and Markov Chains. – Wiley. – 1998. – 726 p.
218. Burke P.J. The output of a queueing system // Operation Research, 1956. – №4. – PP. 699-704.
219. Cabrera B.D., Gosar J. Lee W., Mehra R.K. On the Statistical Distribution of Processing Times in Network Intrusion Detection. – Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control, Bahamas. – December 2004. – PP. 75-80.
220. Chan W.K.V., Hsu C. How Hyper-Network Analysis Helps Understand Human Networks? // Service Science. – 2010. – №2 (4). – PP. 270-280.
221. Chunguang L. Development Trends of Telecom Bearer Network // Annual Review of Communication. – 2007. – Vol. 59. – PP. 155-159.

222. Dan G., Hobfeld T., Oechsner S., Cholda P., Stankiewicz R., Papafili I., Stamoulis G. Interaction Patterns between P2P Content Distribution Systems and ISPs // IEEE Communications Magazine, 2011. – №5. – PP. 222-230.
223. Demers A., Keshav S., Shenker S. Analysis and simulation of a fair queueing algorithm // Internetworking: Research and Experience. – 1990. –Vol. 1. – PP. 3-26.
224. 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. – 884 p.
225. Estrada E. Combinatorial study of the degree assortativity in networks // Physical Review, 2011. – Edition 84. – PP. 47-52
226. Estrada E. The Structure of Complex Networks. – Oxford University Press. – 2011. – 480 p.
227. Feneyrol M. Telecommunication in the 21st Century. The Real and the Virtual. – London: Springer. – 1998. – 222 p.
228. Fukushima M., Yakine T. Performance Analysis of a Differentiated Service Router. – 1999 Graduate Course in Department of Applied Mathematics and Physics Graduate School of Informatics Kyoto University, February 2001. – 31 p.
229. Gross D., Harris C.M. Fundamentals of Queueing Theory. – John Wiley & Sons, Inc. – 1998. – 464 p.
230. ITU-D. Teletraffic Engineering Handbook (edited by V.B. Iversen). – Geneva. – 2003. – 321 p.
231. ITU-T. Definitions of terms related to quality of service. Recommendation E.800. – Geneva. – 2008. – 30 p.
232. ITU-T. Digital exchange performance design objectives. Recommendation Q.543 – Geneva. – 1993. – 40 p.
233. ITU-T. Framework for achieving end-to-end IP performance objectives. Recommendation Y.1542. – Geneva. – 2006. – 26 p.

234. ITU-T. Framework(s) on network requirements and capabilities to support emergency telecommunications over evolving circuit-switched and packet-switched networks. Recommendation Y.1271. – Geneva. – 2004. – 20 p.
235. ITU-T. Network grade of service parameters and target values for circuit-switched services in the evolving ISDN. Recommendation E.721– Geneva. – 1999. – 13 p.
236. ITU-T. Network performance objectives for IP-based services. Recommendation Y.1541. – Geneva. – 2006. – 50 p.
237. ITU-T. Next Generation Networks – Emergency telecommunications – Technical considerations. Recommendation Y.2205. – Geneva. – 2011. – 52 p.
238. ITU-T. The E-model, a computational model for use in transmission planning. Recommendation G.107. – Geneva. – 1998. – 25 p.
239. Kloby K., D'Agostino M.J. Citizen 2.0: Public and Governmental Interaction through Web 2.0 Technologies. – IGI Global. – 2012. – 379 p.
240. Krämer W., Langenbach-Belz M. Approximate Formulae for the Delay in the Queueing System GI/G/1 // Congress book, 8th International Teletraffic Congress. – Melbourne. – 1976. – PP. 235.1-8.
241. Kuhn P. Analysis of Complex Queuing Networks by Decomposition. // Congress book, 8th International Teletraffic Congress. – Melbourne. – 1976. – PP. 346.1-8.
242. Levakov A., Sokolov N. Access to Emergency services during overload traffic period. – 12th International Conference "Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networking", St. Petersburg, 2012, Springer, PP. 424-428.
243. Levakov, A.K. Models of incoming traffic in packet networks / A.K. Levakov, A.N. Sokolov, N.A. Sokolov // T-Comm. – 2015. – №5. PP. 91-94.
244. Linstone H.A. The Delphi Method. Techniques and Application. – New Jersey Institute of Technology. – 2002. – 621 p.
245. Mawson A.R. Understanding mass panic and other collective responses to threat and disaster // Psychiatry. – 2005. – Vol. 68. – No 2. – PP. 95-113.



246. Metzler J. Corporate Networks in Transition: Realizing the Value of Private Optical Networks. – Special Report, Network World Inc. – 2006. – 11 p.
247. Pau L-F., Simonsen P. Emergency messaging to general public via public wireless networks. // Proceedings of the 5th International ISCRAM Conference, Washington, DC, USA. – May 2008. – PP. 3-11.
248. Plevyak T., Sahin V. Next Generation Telecommunications Networks, Services, and Management. – Wiley. – 2010. – 328 p.
249. SMS 112 in Sweden. – <http://www.eena.org/ressource/static/files>.
250. Satyanarayana A., Schoppmann L., Suffel C. A reliability improving graph transformation with applications to network reliability // Network. – 1992. – Vol. 22. – PP. 209-216.
251. Schulzrinne H., Tschofenig H. Internet Protocol-based Emergency Services. – Wiley. – 2013. – 402 p.
252. Sokolov N., Alter A. Broadband Wireless Access and Communications Reliability Provision // Proceedings of the Moscow International Conference "Broadband Russia & CIS Summit", Moscow. – 2004. – P. 139.
253. Sokolov N., Ekhriel I., Rerle R., Brusilovsky S. On some teletraffic model simplification // Computer Networks and ISDN Systems. – 1993. – Vol. 25. – №10. – PP. 1165-1173.
254. Taaffe O. The move from capacity to capability // Telecommunications International. – December, 2005. – P.20.
255. Thomas R.W., Friend D.H., DaSilva L.A., MacKenzie A.B. Cognitive Networks: Adaptation and Learning to Achieve End-to-end Performance Objectives // IEEE Communications Magazine. – 2006. – Vol. 44. – №12. – PP. 51-57.
256. Wolf K., Barnes R. VoIP Emergency Calling: Foundations and Practice. – Wiley. – 2010. – 240 p.
257. [www.3gpp.org](http://www.3gpp.org).
258. <http://www.mchs.gov.ru/activities/results>.
259. [www.munichre.com/en/homepage/default.aspx](http://www.munichre.com/en/homepage/default.aspx).

## Приложение А

### Акты о внедрении полученных результатов

#### 1. Акт внедрения от ЛО ЦНИИС (на двух страницах)



Федеральное государственное унитарное предприятие  
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ СВЯЗИ»

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ФИЛИАЛ «ЛЕНИНГРАДСКОЕ  
ОТДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО НАУЧНО-  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА СВЯЗИ»  
(Филиал ФГУП ЦНИИС – ЛО ЦНИИС)

196128, Санкт-Петербург, ул. Варшавская, 11, Филиал ФГУП ЦНИИС – ЛО ЦНИИС  
Тел.: (812) 369-38-67, факс: (812) 369-38-78, E-mail: [priem@loniis.org](mailto:priem@loniis.org)

Дата 16.06.2014 № 911/778

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Директор ЛО ЦНИИС

д.т.н., профессор

*А.И. Осадчий*  
А.И. Осадчий



Акт

о внедрении результатов диссертационной работы Левакова А.К.

"Модели и принципы функционирования сети связи следующего поколения в чрезвычайных ситуациях", представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Комиссия в следующем составе:

Галанцев С.А., начальник отдела разработки и техподдержки аппаратных средств сетей коммутации, к.т.н. – председатель комиссии;

Синяков А.Р., заместитель начальника отдела разработки и техподдержки аппаратных средств сетей коммутации, к.т.н. – член комиссии;

Шалаев А.Я., ведущий научный сотрудник Технопарка, к.т.н., с.н.с. – член комиссии

составила настоящий акт в том, что научные результаты, полученные Леваковым А.К. в диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, были использованы в ЛО ЦНИИС при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по направлениям:

- оптимизация принципов обслуживания мультисервисного трафика в ведомственных сетях связи при возникновении нештатных ситуаций;
- анализ показателей надёжности функционирования цифровых систем коммутации;
- формирование общих технических требований к программно-аппаратным средствам, используемым в сетях следующего поколения.

Председатель комиссии

Члены комиссии:



С.А. Галанцев



А.Р. Синяков



А.Я. Шалаев

2. Акт внедрения от Макрорегионального филиала "Центр" ОАО "Ростелеком" (на двух страницах)



Открытое акционерное общество междугородной  
и международной электрической связи «Ростелеком»

МАКРОРЕГИОНАЛЬНЫЙ ФИЛИАЛ "ЦЕНТР"

ул. 3-я Хорошевская, дом 17, корп. 1  
Москва, Россия, 123298  
тел.: (499) 998-16-16, факс: (499) 998-16-15  
e-mail: info@center.rt.ru, web: www.center.rt.ru

20.05.2014 № 03/13/1-14

На № от

**УТВЕРЖДАЮ**  
Старший Вице-Президент,  
вице-президент – Директор  
Макрорегионального филиала «Центр»  
ОАО «Ростелеком»



П. А. Зайцев

### АКТ

об использовании результатов, полученных в диссертационной работе Левакова А.К. «Модели и принципы функционирования сети связи следующего поколения в чрезвычайных ситуациях» на сети электросвязи Макрорегионального филиала «Центр» ОАО «Ростелеком».

Комиссия в составе: председателя, начальника Отдела развития IP-сетей, И.Ш. Арифиллина, и членов – главного специалиста Отдела развития IP-сетей, к.т.н. Панова А.Е. и инженера Отдела разработки и тестирования технических решений, к.ф.-м.н. Гуденя В.С. настоящим актом подтверждает использование результатов, полученных в диссертационной работе Левакова А.К., в практической деятельности Макрорегионального филиала «Центр» ОАО «Ростелеком».

Сети связи Макрорегионального филиала «Центр» ОАО «Ростелеком» по составу используемых технологий и средств связи на текущий момент представляют сложную структуру, изменения в которой, в соответствии с тенденциями развития техники и технологий, необходимо тщательно анализировать в целях обеспечения ключевых показателей надежности сети. Важным вопросом анализа сетей связи является предупреждение ситуаций, ведущих к деградации сети в случаях чрезвычайных ситуаций – ЧС.

Методология функционирования сети связи следующего поколения – NGN в режиме ЧС, учитывающая изменение характера мультисервисного трафика, предложенная в диссертационной работе, использовалась при проведении проектно-исследовательских работ на сетях Региональных филиалов Макрорегионального филиала «Центр» ОАО «Ростелеком».

Подтверждена возможность использования результатов математического моделирования и анализа сложных систем и сетей телетрафика для анализа качества обслуживания мультисервисной нагрузки в ЧС в существующих сетях электросвязи.

Принципы, положенные в основу функционирования NGN в режиме ЧС, обеспечивающие приоритетное обслуживание трафика, важного для ликвидации последствий ЧС, нашли применение в плановых организационно-технических мероприятиях по повышению отказоустойчивости сетей связи.

Предложенный в диссертационной работе Левакова А.К. комплекс мер, включающий введение в состав NGN выделенных аппаратно-программных средств («Интеллектуальный шлюз»), обеспечивающих повышение надежности сетей связи в режиме ЧС, нашел практическое применение в Региональных филиалах Макрорегионального филиала «Центр», включенных в Федеральную Программу по созданию Системы-112.

Учитывая положительный опыт Макрорегионального филиала «Центр» ОАО «Ростелеком», полученный при использовании результатов диссертационного исследования Левакова А.К., комиссия считает, что внедрение в полном объеме результатов диссертационного исследования на ЕСЭ Российской Федерации, повысит устойчивость функционирования сетей связи при различных внештатных ситуациях, включая ЧС.


Начальник  
Отдела развития IP-сетей

Главный специалист  
Отдела Развития IP-сетей, к.т.н.

Ведущий инженер  
Отдела разработки и тестирования  
технических решений, к.ф.-м.н.



И.Ш. Арифуллин



А.Е. Панов



В.С. Гудень

## 3. Акт внедрения от сектора стандартизации МСЭ (на одной странице)



МИНИСТЕРСТВО СВЯЗИ  
И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО СВЯЗИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ РАДИО  
(ФГУП НИИР)

Казакова ул., д. 16, Москва, 105064  
Телефон: (499) 261 36 94, (для справок: (499) 261 63 70),  
Факс: (499) 261 00 90, E-mail: [info@niir.ru](mailto:info@niir.ru)  
<http://www.niir.ru>  
ОКПО 01181481, ОГРН 1027700120766  
ИНН/КПП 7709025230/997750001

21.07.2014 № 3345

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Председателю диссертационного  
совета Д 219.004.02

д.т.н, профессору  
А.А.Гоголю

Уважаемый Александр Александрович!

Настоящим подтверждаем использование результатов диссертационной работы Левакова Андрей Кимовича «Модели и методы функционирования сети связи нового поколения в чрезвычайных ситуациях» на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.12.13 в деятельности Исследовательской комиссии 13 «Будущие сети, включая облачные вычисления, сети подвижной связи и сети последующих поколений» МСЭ-Т.

Результаты диссертации А.К. Левакова представлены в ИК-13 (исследовательский вопрос Q3/13) в виде доклада «Дополнение II – Механизм ограничения трафика в чрезвычайных ситуациях» к рекомендации МСЭ-Т Y.1271» (размещён 24.06.2014 на сайте ITU-T под номером 566 по адресу <http://www.itu.int/md/meetingdoc.asp?lang=en&parent=T13-SG13-140707-C&PageLB=100>)

Вклад А.К. Левакова в ИК-13 МСЭ-Т представляет значительный научный интерес в работе по дальнейшему развитию рекомендации Y.1271.

Генеральный директор ФГУП НИИР д.т.н

Ведущий научный сотрудник,  
заместитель председателя ИК-13 МСЭ-Т

Исп. А.Н.Гатилев (495) 647-18-36



В.В. Бутенко

К.Ю.Трофимов

4. Акт внедрения от Главного управления МЧС России по Курской области  
(на двух страницах)



МЧС РОССИИ

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
МИНИСТЕРСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ,  
ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ И ЛИКВИДАЦИИ  
ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ  
ПО КУРСКОЙ ОБЛАСТИ  
(Главное управление МЧС России  
по Курской области)

ул. Можавская, 6, г. Курск, 305000  
Телефон: 70-06-44 Факс: 51-40-82 (код 4712)  
E-mail: emercom-kursk@mail.ru

27.05.14 № 14-173  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Начальник Главного управления  
МЧС России по Курской области  
полковник внутренней службы

Кададов С. А.  
2014



АКТ

**об использовании результатов, полученных в диссертационной работе Левакова А.К. «Модели и принципы функционирования сети связи следующего поколения в чрезвычайных ситуациях», в научно-производственной деятельности Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий.**

Комиссия в составе: председателя – подполковника вн.сл. Воротынцева Б. В., ВРиО начальника отдела информационных технологий, автоматизированных систем управления и связи ГУ МЧС России по Курской области, майора вн.сл. Ганыша В.П., заместителя начальника ФКУ «ЦУКС ГУ МЧС России по Курской области» по связи – начальника эксплуатационно-технического отдела и капитана вн.сл. Прокопова Д.В., начальника отдела оперативного обеспечения связи ФКУ «ЦУКС ГУ МЧС России по Курской области» настоящим актом подтверждает использование результатов диссертационной работы А.К. Левакова в научно-практической деятельности Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий.

Результаты диссертационного исследования А.К. Левакова прошли апробацию при создании Системы-112 Курской области. Целевая архитектура Системы-112 Курской области определена проектом «Развитие системы обеспечения вызовов экстренно-оперативных служб через единый номер «112» на базе ЕДДС (Единых Дежурно-Диспетчерских служб) муниципальных образований на территории Курской области», где в полной мере учтены результаты диссертационного исследования.

В проекте использованы рекомендации для превентивной подготовки NGN (сеть последующего поколения) к работе в режиме ЧС (чрезвычайная ситуация), включая применение оборудования «Интеллектуальный шлюз», предложенного А.К. Леваковым для повышения надежности доступа к Системе-112. Результаты исследования нашли также применение в Курской области, в частности методологического подхода по созданию привилегиро-

ванных условий для обслуживания трафика, важного для ликвидации последствий ЧС.

Эффективность предложенных решений подтверждена испытаниями на опытной зоне Системы-112, организованной МЧС России в Курской области с обслуживанием реальной нагрузки. Учитывая положительные результаты, подтвержденные на опытной зоне в Курской области, комиссия считает целесообразным распространение предложенных автором диссертационной работы рекомендаций в части Системы-112 на другие субъекты Федерации.

ВрИО начальника отдела информационных технологий, автоматизированных систем управления и связи ГУ МЧС России по Курской области  
подполковник вн.сл.



Воротынцев Б. В.

Заместитель начальника  
ФКУ «ЦУКС ГУ МЧС России по Курской области»  
по связи – начальник эксплуатационно-технического отдела  
майор вн.сл.



Ганыш В. П.

Начальник отдела оперативного обеспечения связи ФКУ «ЦУКС ГУ МЧС России по Курской области»  
капитана вн.сл.



Прокопов Д.В.



## 5. Акт внедрения от ОАО "ГИПРОСВЯЗЬ" (на двух страницах)



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ГИПРОСВЯЗЬ»

3-я Хорошевская ул., д. 11, Москва, 123298, Россия, тел.: (499) 197-1231, факс: (499) 197-1074  
 ОГРН 1027739051691, ИНН 7734199657/КПП 773401001, ОКПО 01168078  
 e-mail: mail@giprosvyaz.ru, www.giprosvyaz.ru

УТВЕРЖДАЮ

03.06.2014 № 947/938

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



Генеральный директор

ОАО «ГИПРОСВЯЗЬ»

к.т.н.

Мальш А.А.

«03» июня 2014 г.

Акт

**внедрения результатов диссертационной работы Левакова А.К.  
 на соискание ученой степени доктора технических наук  
 "Модели и принципы функционирования сети связи  
 следующего поколения в чрезвычайных ситуациях"**

Комиссия в составе председателя, Первого заместителя Генерального директора ОАО «ГИПРОСВЯЗЬ» Кармазина Г.Л. а также членов и.о. Заместителя Генерального директора ОАО «ГИПРОСВЯЗЬ» - директора Северо-Западного филиала ОАО «ГИПРОСВЯЗЬ» к.т.н. Пяттаева В.О. и начальника информационно-аналитического отдела Северо-Западного филиала ОАО «ГИПРОСВЯЗЬ» к.т.н. Цуприкова А.Л. подтверждает данным актом, что ОАО «ГИПРОСВЯЗЬ» при разработке проектных решений использовало следующие научные результаты и практические рекомендации, представленные в диссертации А.К. Левакова:

- принципы построения сетей следующего поколения (NGN), обеспечивающие надежность доступа к критически важным узлам системы связи в условиях большого роста трафика и отказах транспортных ресурсов, а также узлов коммутации;
- правила организации отказоустойчивого доступа к центрам обработки вызова в составе программно-аппаратных комплексов "Системы-112";
- методика расчета характеристик качества обслуживания мультисервисного трафика при работе сети NGN в условиях чрезвычайных ситуаций:

Базируясь на основании опыта практического применения, комиссия считает, что использование полученных результатов диссертационной работы Левакова А.К. позволяет

повысить качество выполнения проектов, обеспечить целостность проектных решений и сократить сроки выполнения проектных работ.

Члены комиссии:


Первый заместитель Генерального  
директора ОАО «ГИПРОСВЯЗЬ»

 Кармазин Г.Л.

И.о. Заместителя Генерального директора  
ОАО «ГИПРОСВЯЗЬ» - директора Северо-  
Западного филиала ОАО «ГИПРОСВЯЗЬ»,  
к.т.н.

 Пятгаев В.О.

Начальник информационно-аналитического  
отдела Северо-Западного филиала ОАО  
«ГИПРОСВЯЗЬ», к.т.н.

 Цуприков А.Л.

6. Акт внедрения от Научно-технического центра "ПРОТЕЙ" (на двух страницах)



ООО «НТЦ ПРОТЕЙ»  
197183, Санкт-Петербург  
Липовая аллея, д. 9, Лит. А,  
комн.523, пом.24Н  
Тел.: (812) 449-47-27  
<http://www.protei.ru>, e-mail: [info@protei.ru](mailto:info@protei.ru)

Исх. № 288/14-11  
от «22» 05 2014 г.

УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор  
ООО "НТЦ ПРОТЕЙ"



Н.А. Апостолова

1 мая 2014 г.

АКТ

о внедрении результатов, полученных Леваковым Андреем Кимовичем в диссертационной работе на соискание ученой степени доктора технических наук под названием "Модели и принципы функционирования сети связи следующего поколения в чрезвычайных ситуациях"

Комиссия в составе М.С. Маслов, IT Директор "НТЦ ПРОТЕЙ", М.В. Кабанов, начальник отдела управления проектами Подразделения разработки программного обеспечения (ПО), Ю.Л. Сенченко, руководитель направления "Управление трафиком и широкополосные сети", кандидат технических наук, составила данный акт в том, что научно-технический центр "ПРОТЕЙ" в своих разработках использовал следующие научные результаты, изложенные в диссертации Левакова А.К. на соискание ученой степени доктора технических наук:

1. Способ снижения роста лавинообразного трафика, поступающего в центры обработки вызовов. Предложенное автором решение реализовано в программном обеспечении комплекса Системы-112.

2. Алгоритм снижения количества вызовов в узлах коммутации при возникновении ЧС. Предложенное автором решение реализовано в программно-аппаратных средствах NGN – сети следующего поколения.

3. Принципы применения оборудования "Интеллектуальный шлюз". Предложенные автором концептуальные положения "Интеллектуальный шлюз"

использованы при составлении технического задания и последующей разработке программно-аппаратных средств.

IT Директор



М.С. Маслов

Начальник отдела управления проектами



М.В. Кабанов

Подразделение разработки ПО

Руководитель направления "Управление трафиком и широкополосные сети", к.т.н.



Ю.Л. Сенченко

7. Акт внедрения от группы компании Iskratel, Словения (на двух страницах – оригинал на английском языке и перевод на русском языке)

**ISKRATEL**

Iskratel, d.o.o. Kranj

Ljubljanska cesta 24a  
Kranj 4000, Slovenija  
e-mail: iskratel@iskratel.si  
www.iskratel.si

УТВЕРЖДАЮ  
Генеральной директор Iskratel d.o.o.  
**ISKRATEL**  
Желько Пулич  
Iskratel, Telekomunikacije, d.o.o. Kranj  
Ljubljanska c. 24 a 4000 Kranj  
2014 г.

АКТ

**об использовании результатов, полученных в диссертационной работе Левакова А.К. «Модели и принципы функционирования сети связи следующего поколения в чрезвычайных ситуациях», в производственной деятельности компании Iskratel d.o.o.**

Комиссия в составе: председателя Роберта Кузмича, Главного директора по продажам, и членов - Йозефа Гашпарича, Директора департамента исследований и разработок, Алеша Поточника, Директора департамента сетевых решений настоящим актом подтверждает использование результатов, полученных в диссертационной работе Левакова А.К., в производственной деятельности компании Iskratel d.o.o.

В разработке программного комплекса SI3000 eCIS для обеспечения приема и обработки вызовов экстренных и оперативных служб по единому номеру 112, включающем узел обработки вызовов экстренных и оперативных служб (УОВЭОС), сервер определения местоположения (LRS), центр обработки вызовов 112, сервер обработки карточек событий Системы 112 (WFS), так же в выпускаемом серийно оборудовании коммутации NGN SI3000 CS были использованы следующие результаты диссертационного исследования:

1. В SI3000 eCIS и SI3000 CS применен разработанный алгоритм снижения количества вызовов в узлах коммутации при возникновении ЧС.
2. В комплексном решении компании Iskratel d.o.o. при создании телекоммуникационной подсистемы Системы 112 использованы разработанные методы повышения показателей надежности и живучести сети;
3. В разрабатываемых проектах для операторов связи учтены рекомендации по планированию NGN, учитывающие особенности работы телекоммуникационной подсистемы в ЧС.

Главный директор по продажам

Роберт Кузмич

Директор департамента исследований и разработок

Йозеф Гашпарич

Директор департамента сетевых решений

Алеш Поточник

**ISKRATEL**

IskrateL, d.o.o. Kranj

Ljubljanska cesta 24a  
Kranj 4000, Slovenija  
e-mail: iskrateL@iskrateL.si  
www.iskrateL.siУТВЕРЖДАЮ  
Генеральной директор IskrateL d.o.o.

  
**ISKRATEL** 25  
 Желько Пулич  
 IskrateL, Tehniška kletnica 25  
 Ljubljanska c. 24 a, 4000 Kranj  
 2014 г.

## АКТ

**об использовании результатов, полученных в диссертационной работе Левакова А.К. «Модели и принципы функционирования сети связи следующего поколения в чрезвычайных ситуациях», в производственной деятельности компании IskrateL d.o.o.**

Комиссия в составе: председателя Роберта Кузмича, Главного директора по продажам, и членов - Йозефа Гашпарича, Директора департамента исследований и разработок, Алеша Поточника, Директора департамента сетевых решений настоящим актом подтверждает использование результатов, полученных в диссертационной работе Левакова А.К., в производственной деятельности компании IskrateL d.o.o.

В разработке программного комплекса SI3000 eCIS для обеспечения приема и обработки вызовов экстренных и оперативных служб по единому номеру 112, включающем узел обработки вызовов экстренных и оперативных служб (УОВЭОС), сервер определения местоположения (LRS), центр обработки вызовов 112, сервер обработки карточек событий Системы 112 (WFS), так же в выпускаемом серийно оборудовании коммутации NGN SI3000 CS были использованы следующие результаты диссертационного исследования:

1. В SI3000 eCIS и SI3000 CS применен разработанный алгоритм снижения количества вызовов в узлах коммутации при возникновении ЧС.
2. В комплексном решении компании IskrateL d.o.o. при создании телекоммуникационной подсистемы Системы 112 использованы разработанные методы повышения показателей надежности и живучести сети;
3. В разрабатываемых проектах для операторов связи учтены рекомендации по планированию NGN, учитывающие особенности работы телекоммуникационной подсистемы в ЧС.

Главный директор по продажам

Директор департамента  
исследований и разработокДиректор департамента  
сетевых решений


Роберт Кузмич

Йозеф Гашпарич

Алеш Поточник

## 8. Акт внедрения от СПбГУТ (на двух страницах)

Министерство  
связи и массовых коммуникаций  
Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

Федеральное государственное  
образовательное бюджетное  
учреждение высшего  
профессионального образования

"САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича"  
(СПбГУТ)

Юридический адрес: набережная реки  
Мойки, д. 61, Санкт-Петербург, 191186

Почтовый адрес: пр. Большевиков, д. 22,  
корп. 1, Санкт-Петербург, 193232  
Тел. (812) 3263156, Факс: (812) 3263159  
E-mail: rector@sut.ru

ИНН 7808004760 КПП 784001001  
ОГРН 1027809197635 ОКПО 01179934

*17.06.14 № 1128/14*  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор –  
проректор по учебной работе,  
доктор технических наук, профессор



Г.М. Машков

## Акт

о внедрении научных результатов диссертационной работы  
Левакова А.К. на соискание ученой степени доктора  
технических наук в учебный процесс СПбГУТ

## Комиссия в составе:

- Бузюкова Л.Б., кандидата технических наук, профессора, декана факультета инфокоммуникационных сетей и систем, заведующего кафедрой программной инженерии и цифровой вычислительной техники,
- Гольдштейна А.Б., кандидата технических наук, доцента кафедры инфокоммуникационных систем,
- Гойхмана В.Ю., кандидата технических наук, доцента кафедры инфокоммуникационных систем

составила настоящий акт в том, что научные результаты, полученные Леваковым Андреем Кимовичем в диссертационной работе на соискание ученой степени доктора технических наук, а именно:

1. методы исследования однолинейных систем телетрафика с произвольным характером входящего потока заявок,

2. методы ограничения входящего трафика в центры обслуживания вызовов в случаях его лавинообразного роста при возникновении чрезвычайных ситуаций,
3. принципы проектирования сетей следующего поколения с использованием интеллектуальных шлюзов

использованы в учебном процессе при чтении лекций и проведении практических занятий для магистров по специальности 210700.68 "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" по дисциплинам "Цифровые инфокоммуникации" и "Основы IP-коммуникаций и NGN" в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

Декан факультета инфокоммуникационных сетей и систем,  
заведующий кафедрой программной инженерии и  
цифровой вычислительной техники, к.т.н., профессор



Л.Б. Бузюков

Доцент кафедры инфокоммуникационных систем, к.т.н.



А.Б. Гольдштейн

Доцент кафедры инфокоммуникационных систем, к.т.н.



В.Ю. Гойхман



## Приложение Б

### Результаты измерения трафика, типичного для ЧС

Результаты измерения мультисервисного трафика свидетельствуют, что его изменение существенно отличается от вариации, присущей телефонной нагрузке [79]. Некоторые закономерности, выявленные в процессе изучения телефонной нагрузки, не типичны для мультисервисного трафика или не столь важны с точки зрения построения и эксплуатации сетей NGN. С другой стороны, мультисервисный трафик обладает рядом новых – по отношению к телефонной нагрузке – свойств. Пожалуй, самым важным свойством следует считать проявление самоподобия [206].

Степень самоподобия чаще всего оценивается величиной показателя Херста –  $H$  [8, 206]. Этот параметр может быть вычислен разными способами. Средства измерения, реализованные в тестируемых фрагментах пакетной сети, ориентированы на метод, который основан на построении графика изменения дисперсии [206].

Анализ информации о поведении трафика в типичных ЧС позволил выбрать ряд значений отрезков времени –  $T$ , на которые делится исследуемая последовательность IP-пакетов. В качестве граничных значений были использованы следующие величины:  $T = 10\text{с}$  и  $T = 1000\text{с}$ . Процедуры управления трафиком в период действия ЧС позволяют отказаться от поддержки ряда услуг. Примером такой услуги служит IPTV (Internet Protocol Television) – передача телевизионных сигналов по протоколу IP. Анализ трафика был проведен с поддержкой услуг IPTV и при отказе в предоставлении этого вида связи.

Для оценки показателя Херста на основе полученной исходной выборки данных  $X_0 = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , в которой значения  $x$  – это количество пакетов за интервал времени регистрации (при получении выборок для 10 с и 1000 с он составлял 20 мкс и 1 мс соответственно), формируются агрегированные выборки

$X_m = \{x_1^{(m)}, \dots, x_i^{(m)}, \dots, x_{n/m}^{(m)}\}$ . В этих выборках для интервала агрегирования, равного  $m$ , величины  $x_i^{(m)}$  определяются по такой формуле:

$$x_i^{(m)} = \frac{\sum_{j=1}^m x_{(i-1)m+j}}{m}. \quad (\text{Б.1})$$

Для полученных выборок вычисляются дисперсии  $D_0 = \sigma^2(X_0)$  и  $D_m = \sigma^2(X_m)$ . Затем строится график следующего вида:

$$\lg\left(\frac{D_m}{D_0}\right) = f(\lg(m)). \quad (\text{Б.2})$$

График аппроксимируется прямой линией, уравнение которой известно:  $a \lg(m) + b$ . Подбор постоянных  $a$  и  $b$  обычно осуществляется методом наименьших квадратов [179]. Величина  $a$  получается отрицательной. Она связана с показателем Херста таким соотношением [8, 206]:

$$H = 1 - \frac{|a|}{2}. \quad (\text{Б.3})$$

На рисунках Б.1 – Б.4 показаны зависимости (Б.2), построенные для двух значений отрезков времени, на которые делится исследуемая последовательность IP-пакетов (10 и 1000 с). Графики Б.1 и Б.3 отображают исследуемый процесс для суммарного трафика, включающего те пакеты, которые связаны с поддержкой услуги IPTV. Графики Б.2 и Б.4 построены при условии, что услуги IPTV не поддерживаются.

Полученные оценки свидетельствуют, что отказ от поддержки услуг IPTV позволяет снизить значение показателя Херста. Это подтверждает эффективность процедур управления трафиком, предложенных в диссертационной работе.

Кроме того, вычисленные величины показателя Херста позволяют выбрать те значения  $C_A$  – коэффициента вариации для входящего потока заявок (IP-пакетов), которые следует использовать при проведении аналитических расчетов и имитационного моделирования. Для решения поставленной задачи можно ис-

пользовать результаты, приведенные в [8], в части зависимости между величинами  $H$  и  $C_A$ .

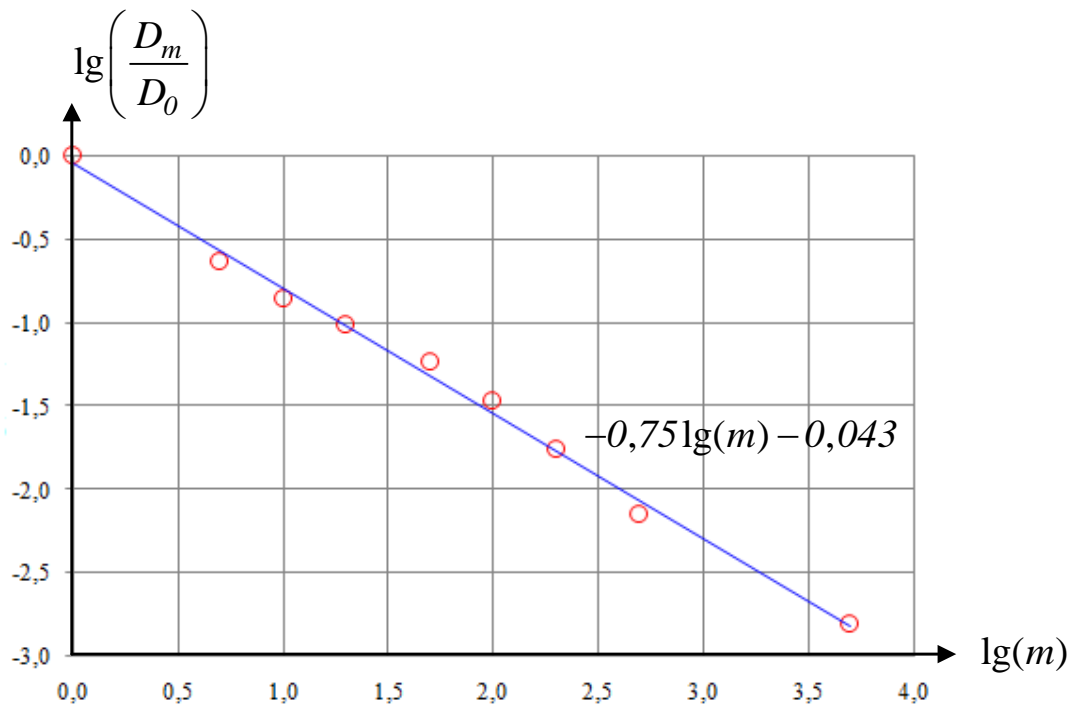


Рисунок Б.1 –  $T = 10s$ ; услуги IPTV поддерживаются;  $H \approx 0,625$

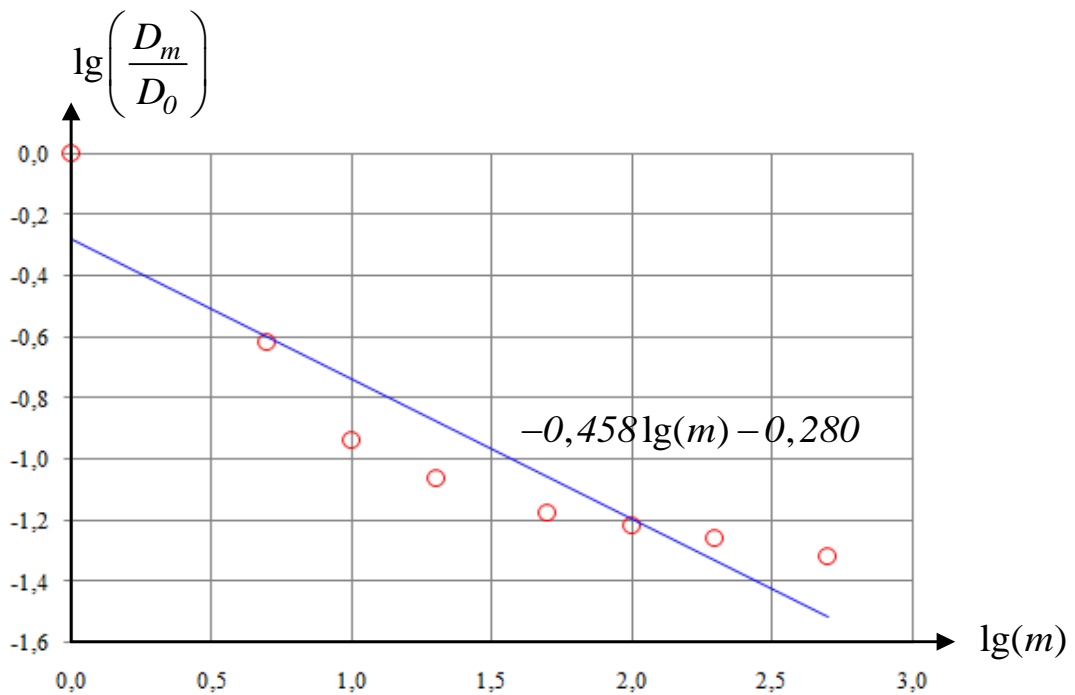


Рисунок Б.2 –  $T = 10s$ ; услуги IPTV не поддерживаются;  $H \approx 0,771$

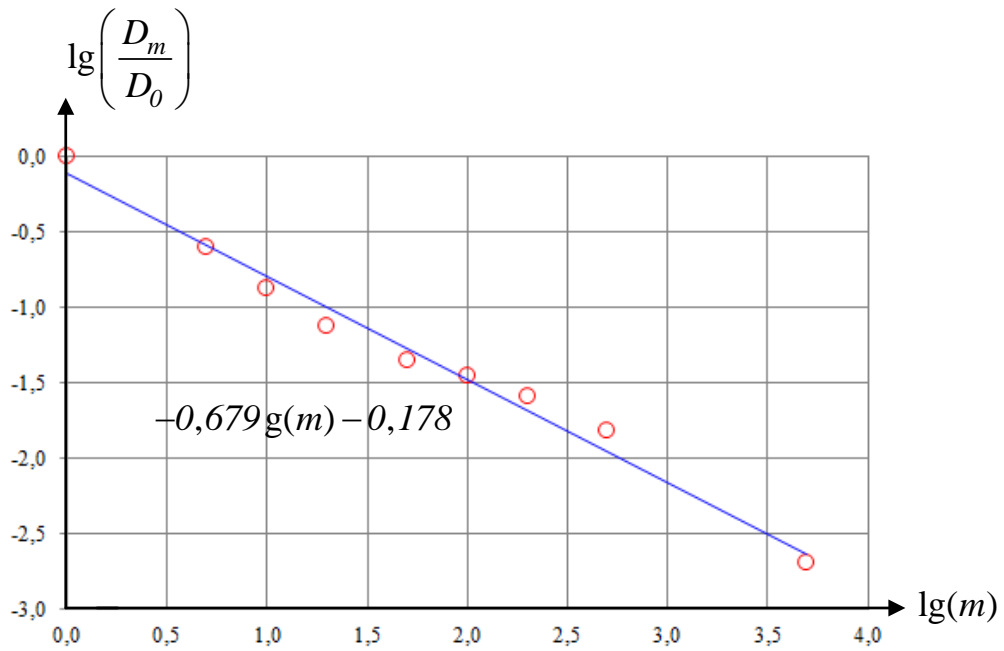


Рисунок Б.3 –  $T = 1000$  с; услуги IPTV поддерживаются;  $H \approx 0,660$

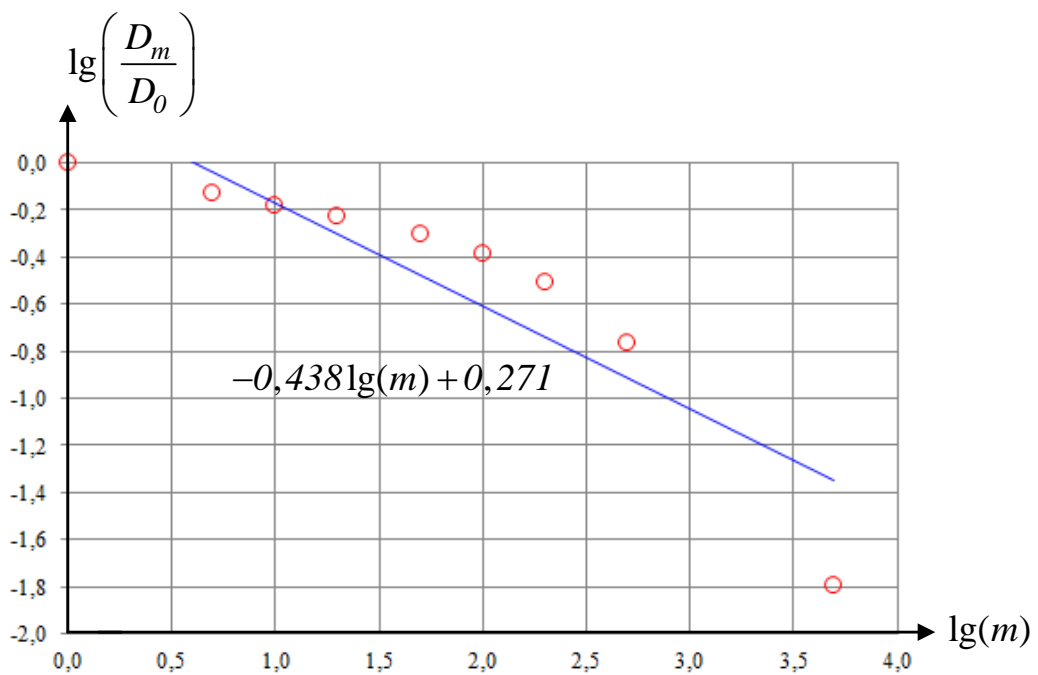


Рисунок Б.4 –  $T = 1000$  с; услуги IPTV не поддерживаются;  $H \approx 0,781$

Эта зависимость для двух видов распределений, которые часто используются для адекватного описания входящего потока заявок, приведена графически на рисунке Б.5 [8].

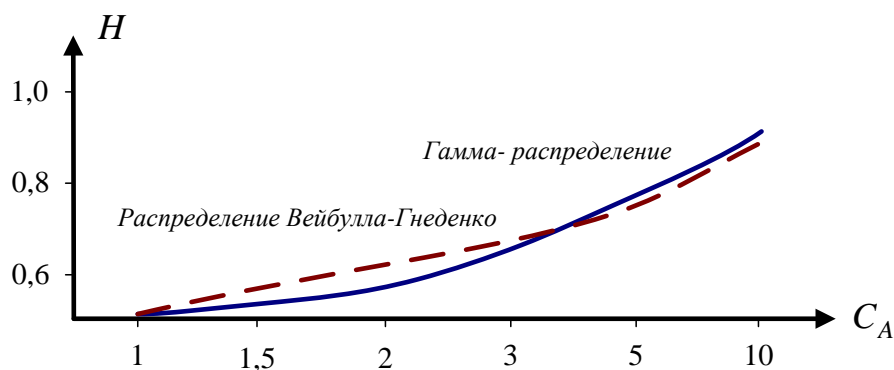


Рисунок Б.5 – Связь коэффициента вариации  $C_A$  и параметра Херста  $H$

Полученные значения параметра Херста, указанные на предыдущих графиках, позволяют ограничить диапазон изменения величины коэффициента вариации следующим неравенством:  $C_A \leq 10$ . Следует подчеркнуть еще одно важное обстоятельство: при ограничении пакетного трафика только речевой информацией параметр Херста составил 0,420 – рисунок Б.6. Это означает, что трафик речи, передаваемой в форме IP-пакетов, не обладает свойствами фрактальности.

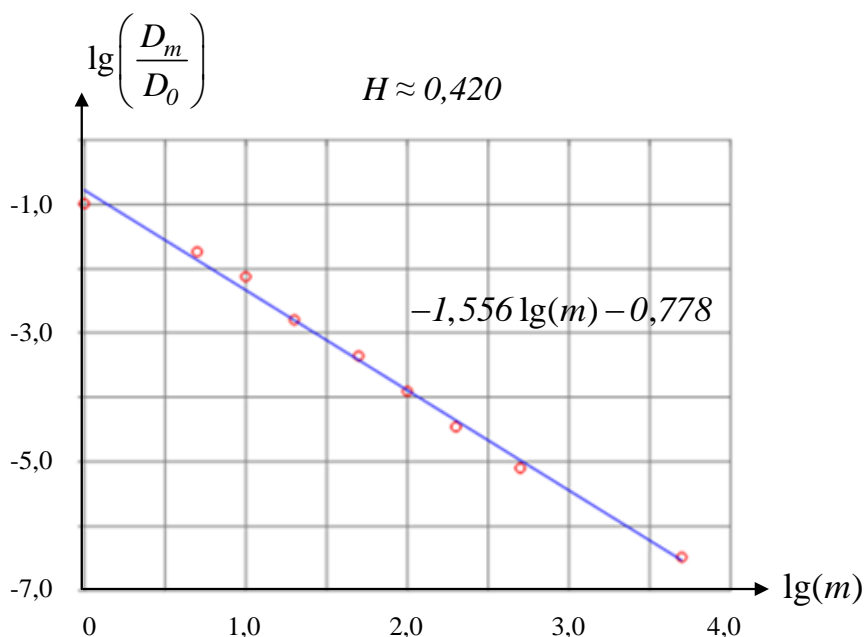


Рисунок Б.6 – Отсутствие свойства фрактальности при отказе от ряда услуг

Графики построены на основании экспериментальных данных, полученных в Макрорегиональном филиале "Центр" ПАО "Ростелеком".

## Приложение В

### Результаты моделирования многолинейной СМО с паузами между попытками вызовов

Для оценки качества обслуживания трафика в том фрагменте ССОП, который основан на технологии "коммутация каналов", необходимо вычислить вероятность потерь в пучке соединительных линий, которые связывают два УК между собой. С этой целью была исследована модель, которая аналогична выбранной в параграфе 5.3.2, но с количеством обслуживающих приборов, превышающем единицу.

Формально исследование той части ССОП, которая построена с использованием технологии "коммутация каналов", не входит в тему диссертационной работы. С другой стороны, длительный период времени канальные и пакетные технологии будут сосуществовать в единой телекоммуникационной системе. По этой причине аспекты функционирования фрагмента ССОП, который основан на технологии "коммутация каналов", представляется важной частью общего исследования. Результаты вынесены в Приложение В, чтобы не нарушать целостной картины диссертационной работы, посвященной NGN – сети связи следующего поколения, основанной на пакетных технологиях передачи, коммутации и обработки информации.

Подобная модель представляет собой СМО, обслуживающую интенсивность нагрузки  $Y$  при помощи  $V$  обслуживающих приборов. Аналитическое исследование предложенной модели из-за введения пауз длительностью  $\tau$  не представляется возможным. По этой причине оценка вероятности потерь вызовов осуществляется при помощи имитационного моделирования. Пауза между попытками вызова варьируется. Она выражается как доля среднего времени обслуживания заявок  $\vartheta$ .

По аналогии с обозначениями, принятыми для систем без ожидания вероятность потери обозначается ниже как  $E(Y, V, \vartheta)$ . В отличие от первой формулы Эрланга, обозначаемой как  $E(Y, V)$ , исследуемая функция определяется своего рода "условную вероятность". Причина ввода такого словосочетания обусловлена тем, что вычисляется вероятность при условии введения пауз между попытками установления соединения.

На рисунке В.1 приведены функции  $E(Y, V)$  и  $E(Y, V, \vartheta)$ . Графики построены для трех разных соотношений величин  $Y$  и  $V$  при условии, что  $V = 30$ . По оси абсцисс отложены значения параметра  $\vartheta$  – нормированной величины длительности паузы между попытками вызова. Для оси ординат выбран логарифмический масштаб.

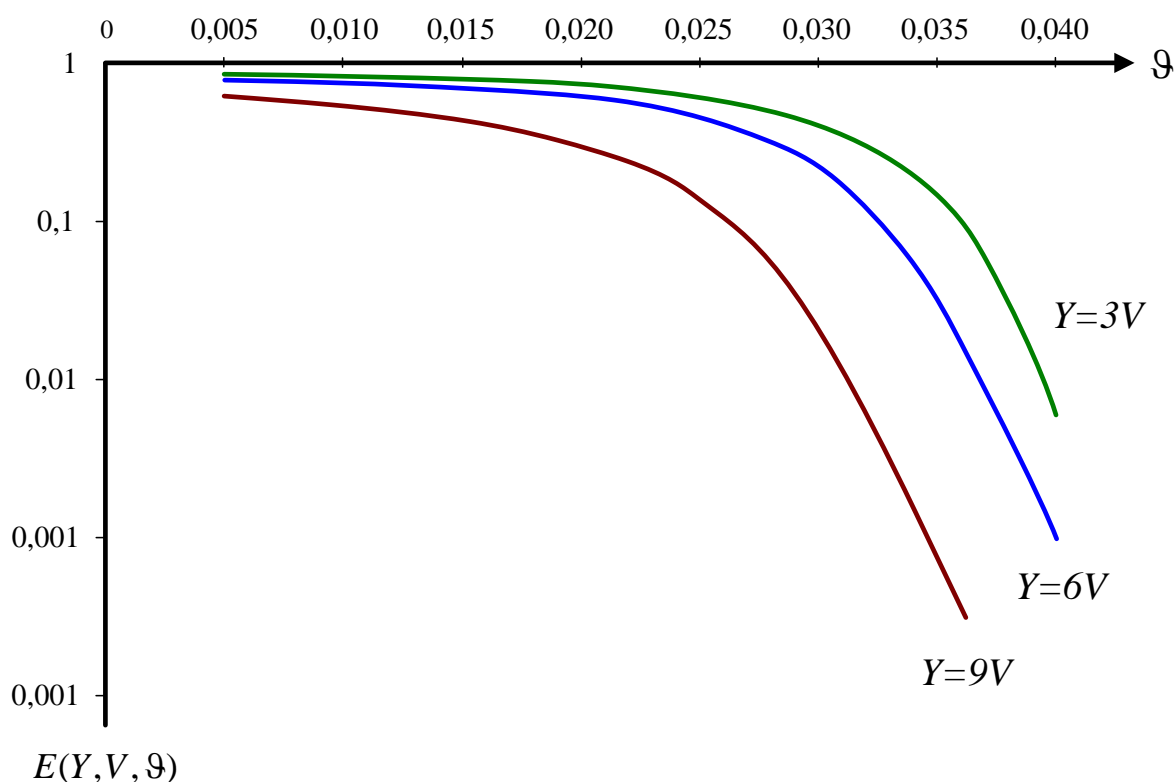


Рисунок В.1 – Изменение вероятности потерь вызовов при введении пауз;  $V = 30$

Величины  $E(Y, V)$  не зависят от  $\vartheta$ . Эти вероятности принимают следующие значения:

- $E(Y = 3 \cdot V, V) \approx 0,67$ ;

- $E(Y = 6 \cdot V, V) \approx 0,83$ ;
- $E(Y = 9 \cdot V, V) \approx 0,89$ .

Очевидно, что введение сравнительно небольших пауз между попытками установления соединения позволяет значительно снизить количество потерянных вызовов из той их совокупности, которая принята узлом коммутации на обслуживание.

На рисунке В.2 приведены функции  $E(Y, V)$  и  $E(Y, V, \vartheta)$ , построенные для тех же соотношений величин  $Y$  и  $V$ , но при условии, что  $V = 3$ . Они иллюстрируют следующий факт: для пучков соединительной линий малой емкости при тех же соотношениях величин  $Y$  и  $V$  для соблюдения одинаковой нормы потерь необходимо увеличивать паузы между попытками вызовов.

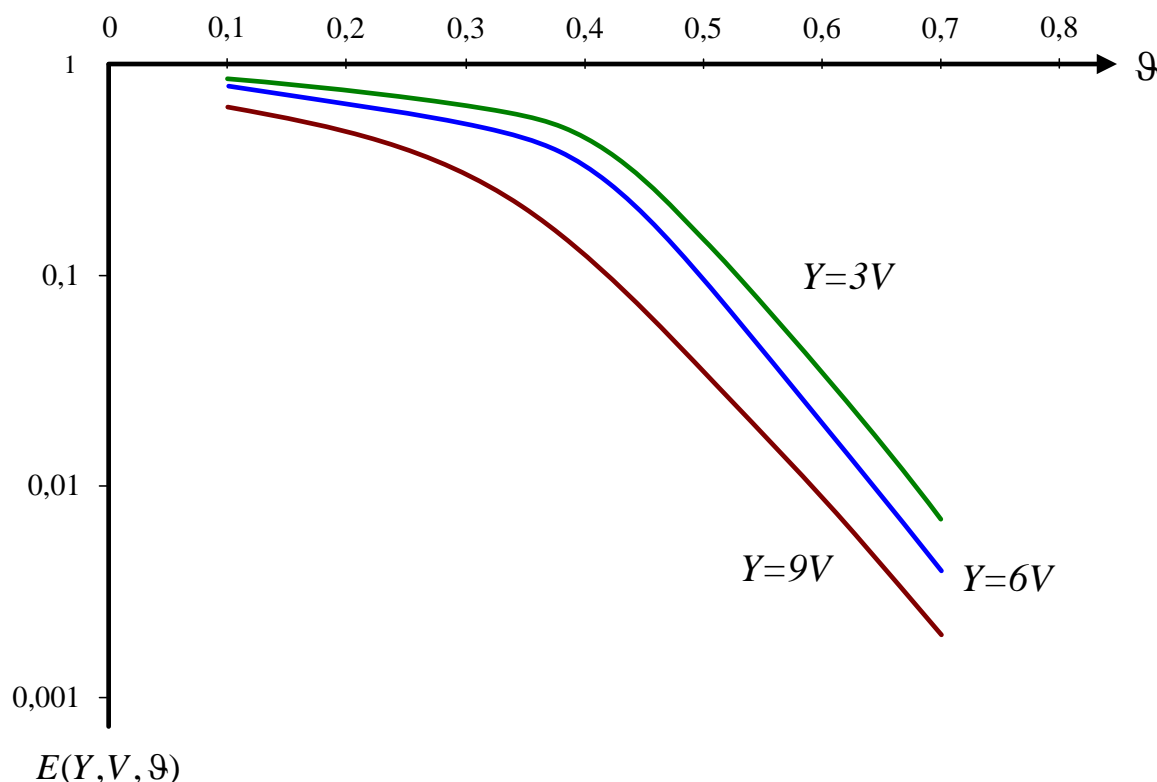


Рисунок В.2 – Изменение вероятности потерь вызовов при введении пауз;  $V = 3$

Реализация предлагаемых методов управления трафиком не связана с решением сложных технических задач. Основные проблемы заключаются в принятии пользователями новых правил обслуживания трафика в период действия ЧС. По



всей видимости, необходимо согласовать и утвердить нормативный документ, оговаривающий возможность применения рассматриваемых методов управления трафиком, а также проинформировать об этом пользователей ССОП.

Для улучшения восприятия предлагаемых решений пользователям ССОП должна быть предоставлена информация разъяснительного характера. Эта задача включает два основных аспекта. Во-первых, необходимо периодически, используя различные средства массовых коммуникаций, доводить до сведения населения информацию о возможных изменениях в обслуживании вызовов. Во-вторых, в период действия ЧС целесообразно использовать так называемые "речевые подсказки" для лучшего понимания пользователями механизма установления соединений. В частности, одной из таких подсказок может служить фраза примерно следующего содержания: "Время разговора ограничено сорока секундами".