

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ**

**ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

На правах рукописи

Моат Талат Рамадан Салах

УДК 621.391

**МЕТОД СИНТЕЗА НАЛОЖЕННЫХ  
ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ  
САМОПОДОБНОГО ГРУППОВОГО ТРАФИКА**

05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
Агеев Дмитрий Владимирович  
доктор технических наук  
профессор

Харьков - 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ .....	6
ВВЕДЕНИЕ .....	7
РАЗДЕЛ 1 ОБЗОР МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ СТРУКТУРНОГО И ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ .....	14
1.1. Особенности процесса проектирования и построения современных инфокоммуникационных систем .....	14
1.2. Анализ принципа построения инфокоммуникационных систем как совокупности наложенных сетей .....	17
1.3. Анализ используемых методов структурного и параметрического синтеза современных телекоммуникационных систем .....	19
1.4. Анализ методов структурного и параметрического синтеза наложенных телекоммуникационных систем ...	22
1.5. Анализ свойств трафика, передаваемого в инфокоммуникационных сетях .....	26
1.6. Применение математических моделей самоподобных процессов для анализа и синтеза мультисервисных телекоммуникационных систем .....	28
1.7. Общая постановка задачи диссертационного исследования .....	32
1.8. Выводы по первому разделу .....	33
РАЗДЕЛ 2 Разработка математической модели трафика в наложенной инфокоммуникационной сети .....	35
2.1. Особенности параметрического синтеза мультисервисных инфокоммуникационных сетей .....	35
2.2. Определения и основные свойства самоподобных процессов .....	36
2.3. Математические модели потоков в мультисервисной телекоммуникационной системе .....	42

2.3.1.	Моделирование индивидуальных источников трафика в сети.....	42
2.3.2.	Моделирование группового трафика в инфокоммуникационной сети.....	45
2.4.	Определение параметров качества обслуживания в узлах сети под воздействием самоподобного трафика..	51
2.5.	Определение параметров качества обслуживания группового потока в узлах мультисервисной телекоммуникационной сети.....	56
2.6.	Методы параметрического синтеза мультисервисных наложенных телекоммуникационных сетей с применением математической модели многослойного графа.....	62
2.7.	Выводы по второму разделу.....	66
РАЗДЕЛ 3 МНОГОЭТАПНЫЙ синтез инфокоммуникационных Сетей ...		68
3.1.	Метод параметрического синтеза инфокоммуникационной сети с групповой адресацией.	68
3.1.1.	Общая характеристика решаемой задачи параметрического синтеза сети с групповой адресацией.....	68
3.1.2.	Математическая постановка задачи выбора маршрутов доставки трафика с групповой адресаций.....	69
3.1.3.	Выбор метода решения задачи.....	70
3.1.4.	Постановка задачи синтеза с использованием математической модели многослойных графов..	71
3.1.5.	Метод решение подзадачи выбора мест установки сервера и выбора маршрута передачи группового трафика .....	72

3.1.6. Метод решения подзадачи выбора пропускных способностей каналов связи для самоподобного трафика при известном распределении потоков	79
3.2. Структурный и параметрический синтез инфокоммуникационной сети с несколькими периодами нагрузки	84
3.2.1. Общая характеристика синтезируемой инфокоммуникационной сети с несколькими периодами нагрузки	84
3.2.2. Предметная постановка задачи синтеза инфокоммуникационной сети с несколькими периодами нагрузки	85
3.2.3. Выбор метода решения задачи	87
3.2.4. Метод решения подзадачи выбора мест установки серверов и маршрутов передачи трафиков	88
3.2.5. Метод выбора пропускных способностей каналов связи для самоподобного трафика при известном распределении потоков	93
3.3. Выводы по разделу 3	97
<b>РАЗДЕЛ 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННЫХ В РАБОТЕ МЕТОДОВ СТРУКТУРНОГО И ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ИНФОкоммуникационных СЕТЕЙ</b>	
4.1. Общая методика проведения исследования предложенных в работе методов структурно-параметрического синтеза	98
4.2. Описание структуры программного пакета используемого при проведении исследования	99

4.3. Общая методика исследования эффективности предложенных в работе методов синтеза с применением программного пакета.....	102
4.4. Исследование метода структурно-параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей с несколькими периодами нагрузки.....	103
4.4.1. Сопоставление результатов синтеза для однопериодного и многопериодного подхода ..	104
4.4.2. Сопоставление результатов многопериодного синтеза с применением моделей простейшего потока и моделей самоподобного процесса .....	106
4.5. Методика проведения исследования с использованием имитационного моделирования .....	109
4.6. Построение экспериментального фрагмента инфокоммуникационной сети .....	111
4.7. Анализ реализаций информационных потоков .....	112
4.7.1. Процедура агрегирования.....	113
4.7.2. Исследование полученных реализаций и определение параметров информационных потоков.....	114
4.8. Исследование модели трафика в наложенной инфокоммуникационной сети .....	116
4.9. Анализ результатов структурно-параметрического синтеза инфокоммуникационной сети с применением средств имитационного моделирования .....	118
4.10. Выводы по четвертому разделу.....	123
ВЫВОДЫ .....	125
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	128

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

МСТ	-	многослойный граф
ТКС	-	телекоммуникационная система
IP	-	<i>Internet Protocol</i> – протокол сетевого уровня Internet
MAN	-	<i>Metropolitan Area Network</i> – региональная сеть
MPLS	-	<i>MultiProtocol Label Switching</i> – многопротокольная коммутация по меткам
OSI	-	<i>Open System Interconnection</i> - взаимодействие открытых систем
QoS	-	<i>Quality of Service</i> - качество обслуживания
NGN	-	<i>Next Generation Network</i> – сеть следующего поколения
SDH	-	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i> – синхронная цифровая иерархия
VoIP	-	<i>Voice over IP</i> – речь поверх сети IP
WAN	-	<i>Wide Area Network</i> – глобальная сеть

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** В последнее время наблюдается бурное развитие информационных технологий. Это развитие характеризуется постоянным ростом требований к эффективности инфокоммуникационных сетей, расширением их функциональных возможностей, накладывает свой отпечаток на процесс проектирования. Технологии, применение которых предусматривает концепция NGN, сегодня являются наиболее перспективными. Вместе с тем наблюдается опережение развития технических средств по развитию методов проектирования, является одной из актуальных проблем современных телекоммуникационных систем.

Характеристики любой технической системы, эффективность ее функционирования закладывается на этапе проектирования. Именно от методов проектирования, от адекватности математических моделей, используемых при этом, зависят свойства и жизнеспособность будущей системы.

Современные инфокоммуникационные сети являются большими сложными системами, которые имеют многоуровневую структуру во многих аспектах рассмотрения. Особого внимания заслуживает структура, образованная наложенными сетями. Процессы, происходящие на разных уровнях иерархии, тесно взаимосвязаны и оказывают значительное влияние друг на друга. Также значительное влияние оказывает и структура сети на одном из уровней на характеристики другого. Поэтому в процессе решения задач структурного и параметрического синтеза к системе, которая синтезируется, необходимо подходить, как к единому целостному объекту.

Указанная многоуровневая, многоаспектная структура дополнительно осложняется при решении задач синтеза, когда в сложной структуре системы, которая проектируется, дополнительно необходимо учитывать различные используемые варианты телекоммуникационных технологий, их совместимость и взаимодействие. Учет многоуровневой

структуры современных инфокоммуникационных систем требует разработки новых математических моделей, позволяющих адекватно описывать существующие физические и логические связи между элементами системы на разных ее уровнях, различных видов иерархий и эффективно решать задачи структурного и параметрического синтеза в ходе их проектирования.

Одной из наиболее удачных моделей является многослойный граф. Использование данной модели позволяет адекватно описывать топологию каждой из наложенных сетей и взаимосвязь между процессами, происходящими на разных ее уровнях, а также представлять инфокоммуникационную систему на этапе ее проектирования как единый целостный объект.

Указанные особенности процесса создания и развертывания современных инфокоммуникационных сетей, а также наложен принцип их построения требует проведения дополнительных исследований и пересмотра методов структурного и параметрического синтеза, используемого для их проектирования.

Сейчас решения задач параметрического синтеза инфокоммуникационных систем базируется на использовании методов теории телетрафика, которая является частью теории массового обслуживания. Математические модели, которые составляют эту теорию, хорошо описывают процессы, происходящие в таких системах, как телефонные сети, построенные по принципу коммутации каналов. Наиболее распространенной моделью потока вызовов (данных) в теории телетрафика является простейший поток (стационарный ординарный поток без последствия), который также называется стационарный пуассоновский поток.

В то же время, как показали результаты исследования, потоки в мультисервисных сетях имеют совершенно иную структуру, которая отличается от принятого в классической теории телетрафика. Указанное



приводит к тому, что расчет параметров инфокоммуникационной системы, предназначенной для обслуживания такого трафика, по классическим формулам дает некорректные и неоправданно оптимистические результаты. Более адекватными моделями для описания этих потоков являются модели самоподобных (фрактальных) процессов, которые учитывают указанные выше свойства информационных потоков. Последнее увеличивает количество параметров, описывающих эти информационные потоки, которые в данный момент не применяются при математическом моделировании этих процессов классическими моделями. Это значительно влияет на результаты проектирования современных телекоммуникационных сетей и вызывает потребность в значительной коррекции методов синтеза.

Таким образом, тему диссертационной работы и **научно-прикладную задачу**, которая заключается в разработке новых и совершенствовании существующих методов структурного и параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей с использованием моделей многослойных графов и представление потоков в сети как самоподобных процессов с целью использования их в ходе проектирования, можно считать актуальной.

#### **Связь работы с научными программами, планами, темами.**

Диссертационная работа непосредственно связана с реализацией основных положений «Концепции национальной информационной политики», «Концепции Национальной программы информатизации», «Концепции конвергенции телефонных сетей и сетей с пакетной коммутацией в Украине» и с «Основными принципами развития информационного общества в Украине на 2007-2015 годы».

Кроме того, направление исследований было связано с планами университета и кафедры телекоммуникационных систем, где выполнялась данная работа, а также тематикой научно-исследовательских работ кафедры телекоммуникационных систем Харьковского национального университета радиоэлектроники.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является повышение эффективности параметрического и структурного синтеза инфокоммуникационных сетей по техническим и экономическим показателям.

*Объектом исследования* в диссертационной работе является процесс проектирования инфокоммуникационных сетей.

*Предметом исследования* являются математические модели и методы структурного и параметрического синтеза инфокоммуникационной сети.

*Методами исследования* являются: методы оптимизации, математическая статистика и теория вероятностей, теория массового обслуживания, теория графов, теория самоподобных процессов, методы имитационного моделирования.

*Задачи исследования.* Согласно поставленной цели, в диссертационной работе решаются следующие основные задачи исследования:

- осуществление анализа теоретических результатов в области: структурного и параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей; математического моделирования трафика в сети; выявление путей достижения цели исследования;
- обоснование и осуществление выбора математических моделей для описания мультисервисного трафика на различных участках инфокоммуникационной сети, которые учитывают различные типы единиц данных в наложенных сетях и учитывают наличие свойства самоподобия;
- разработка метода параметрического синтеза инфокоммуникационной сети в условиях передачи Multicast трафика с использованием модели в виде многослойного графа;
- разработка метода структурного и параметрического синтеза инфокоммуникационной сети с несколькими периодами нагрузки;
- проведение числовых, имитационных и натурных экспериментов по исследованию адекватности математических моделей и эффективности

предложенных методов синтеза и выработки практических рекомендаций по их применению.

**Научная новизна полученных результатов.** При решении поставленных задач были получены следующие новые научные результаты:

1. Получила дальнейшее развитие модель трафика в наложенных сетях, за счет учета эффекта самоподобия и различных единиц данных, передаваемых по сети. Это позволило учесть влияние процессов, происходящих на более высоких уровнях инфокоммуникационной сети на характеристики трафика.

2. Получил дальнейшее развитие метод параметрического синтеза инфокоммуникационной сети с multicast трафиком, за счет использования для описания трафика модели самоподобных процессов. Это позволило уменьшить задержку в сети при передаче мультисервисного multicast трафика за счет корректного определения пропускных способностей каналов связи.

3. Получил дальнейшее развитие метод многотеридного параметрического синтеза инфокоммуникационной сети, отличительной особенностью которого является описание информационных потоков в сети моделью самоподобных процессов. Это позволило уменьшить задержку пакета за счет корректного определения пропускных способностей каналов связи.

**Практическое значение полученных результатов.** Предложенные в работе математические модели и методы проектирования инфокоммуникационных наложенных сетей имеют важное практическое значение, поскольку открывают возможность построения оптимальных многослойных структур, характерных для современного этапа развития инфокоммуникационных систем.

Практическая ценность полученных в диссертации результатов заключается в том, что предложенные в диссертационной работе математические модели и методы структурного и параметрического синтеза

получили программную реализацию в виде пакета, который дает возможность решать задачи синтеза структуры и определения параметров структурных элементов телекоммуникационной системы. С помощью данного программного обеспечения была доказана возможность практической реализации и работоспособности предложенных в работе методов. Разработка предназначена для применения в процессе проектирования мультисервисных телекоммуникационных систем.

**Личный вклад соискателя.** Работа выполнена на кафедре телекоммуникационных систем Харьковского национального университета радиоэлектроники. Все основные научные результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно и полностью опубликовано в специализированной литературе [1-10].

В работах, выполненных в соавторстве, лично Моат Талат Рамадан Салах принадлежат следующие научные результаты:

- в [1] проведено исследование телекоммуникационной системы иерархической структуры на примере решения задач многоадресной маршрутизации;

- в [2] математическая модель мультисервисного трафика с учетом эффекта самоподобия в условиях наложенных сетей и метод их параметрического синтеза;

- в [3] математическая модель мультисервисного трафика в инфокоммуникационной сети, учитывающей наличие эффекта самоподобия;

- в [4] совершенствование метода решения задачи;

- в [5] модель трафика в программно-конфигурируемых сетях;

- в [6] потоковая модель для многослойного графа с учетом эффекта самоподобия трафика с несколькими периодами нагрузки.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты диссертации докладывались на 4-х международных форумах и конференциях: Международной научно-практической конференции «Проблемы

инфокоммуникаций. Наука и технологии »(PIC S&T-2014) (г. Харьков, ХНУРЭ, 2014); Седьмой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Перспективы развития информационно-телекоммуникационных технологий и систем» (Киев, НТУУ КПИ, 2015); Шестой международной научно-практической конференции «Инфокоммуникации - современность и будущее» (Одесса, ОНАС, 2016); Пятой Международной научно-практической конференции «Физико-технологические проблемы передачи обработки и хранения информации в инфокоммуникационных системах» (Черновцы, ЧНУ, 2016), а также на научных семинарах кафедры телекоммуникационных систем ХНУРЭ.

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 10 научных работ, из которых 6 статей: 5 статей в профессиональных изданиях Украины [1-5] и 1 статья за границей в международном научном журнале, индексируется в научно-метричной базе Scopus; 4 материалы международных конференций, проходивших в Украине [7-10]. Все по теме диссертационной работы.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация объемом 127 страницы основного текста состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений, содержит 20 рисунков, 6 таблиц и список использованных источников из 60 наименований.

# РАЗДЕЛ 1

## ОБЗОР МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ СТРУКТУРНОГО И ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

В данном разделе проведен анализ современного состояния и принципов построения инфокоммуникационных сетей. Рассмотрены задачи, возникающие при развертывании современных мультисервисных телекоммуникационных систем. Проведен анализ математических моделей и методов структурного и параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей. Проведен анализ методов параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей и математических моделей информационных потоков, используемых при параметрическом синтезе.

### 1.1. Особенности процесса проектирования и построения современных инфокоммуникационных систем

Современное развитие инфокоммуникационных технологий характеризуется глобальной персонализацией и унификацией коммуникаций. Пользователи инфокоммуникационных систем используют для работы с системой несколько электронных устройств — ноутбук и мобильный телефон, смартфон или карманный компьютер. Эти устройства необходимо синхронизировать, передавать информацию из одного в другое с учетом используемого формата. Для доступа к инфокоммуникационной системе для обмена информацией между устройства и пользователями используются различные виды связи: телефонная, голосовая и электронная почта, обмен факсимильными и мгновенными сообщениями, мультимедийные конференции, SMS, MMS и многие другие.

Как показывает опыт, телекоммуникационные системы на базе IP-технологий не только помогают решить многие проблемы, связанные с управлением, но и создают наиболее благоприятные условия для автоматизации производства благодаря внедрению современных компьютерных систем обработки информации.

Внедрение конвергентных IP-инфокоммуникационных структур, обеспечивая одновременную передачу данных, голоса и видео, активизирует протекание бизнес-процессов и повышает их эффективность благодаря сокращению затрат. Это подтверждается результатами проведенных в 2005 году международным исследовательским агентством Sage Research исследований [11], в которых участвовали представители ведущих компаний промышленно развитых стран.

При модернизации и создании инфокоммуникационных сетей на стадии проектирования необходимо решать ряд задач [12]:

- определение оптимальных значений параметров, обеспечивающих требуемый уровень производительности (пропускная способность, задержка и др.);
- гарантирование необходимой производительности на стадии перед закупкой оборудования;
- оценка влияния локальных изменений на производительность всей сети в целом;
- выявление участков и узлов сети с недостаточной производительностью до введения инфокоммуникационной сети в эксплуатацию;
- учет трафика поступающего и возникающего в сети при предоставлении инфокоммуникационных услуг;
- сокращение времени разработки проекта будущей инфокоммуникационной сети.

В результате собираются статистические данные о таких важных параметрах и характеристиках сети как вероятность потерь пакетов,

коэффициент загрузки каналов связи и узлов сети, задержка и джиттер в сети и других, определяющих выбор конфигурации инфокоммуникационной сети и спецификации необходимого оборудования.

В жизненном цикле инфокоммуникационных систем условно можно выделить несколько тесно связанных основных этапов:

- предпроектный этап;
- проектирование системы;
- развертывание системы;
- активная эксплуатация;
- смена статуса (модернизация, демонтаж).

При этом каждый этап – по своей продолжительности, ресурсозатратам очень зависит от качества и эффективности предыдущих работ и своевременности их выполнения. Проектирование и развертывание инфокоммуникационных систем являются насыщенными по числу как взаимозависимых событий, так и по числу участвующих специалистов различного профиля.

Важной составляющей являющейся является инструментарий, используемый в процессе проектирования инфокоммуникационных сетей. Здесь можно отметить работу [13] в которой обобщается опыт проектирования интегрированных компьютерных сетей, предложен подход с преимущественным использованием проектной информации с использованием инструментария проекта CANDY framework@TUD [14–16].

Таким процесс проектирования является важной составляющей создания и модернизации инфокоммуникационных сетей, определяющей в значительной мере характеристики и эффективность будущей сети. При этом необходимо учитывать ряд важных специфических свойств инфокоммуникационных сетей, которые будут рассмотрены ниже.



## 1.2. Анализ принципа построения инфокоммуникационных систем как совокупности наложенных сетей

Современные инфокоммуникационные сети являются сложными системами, строящиеся по иерархическому, многоуровневому принципу. Уровни этой иерархии представляют собой наложенные сети. В пределах каждой из этих сетей могут использоваться различные телекоммуникационные технологии. При этом каждая связь в верхнем уровне использует один или несколько путей на более низком уровне. Так, например, канал между IP-маршрутизаторами обеспечивается обычно некоторым путем в нижележащей сети, например, Ethernet. Если выделить в иерархии технологических уровней два взаимодействующих уровня, то можно отметить, что связь между узлами в вышележащем уровне называется логической связью, в то время как, связи, которые реализуют путь на нижнем уровне, называются физическими связями. В частности, физические связи транспортного уровня могут реализовываться за счет путей на более низком уровне. Реальные сети могут содержать стек уровней, если данная телекоммуникационная технология учитывает их наличие. Основное преимущество многослойной структуры инфокоммуникационной сети то, что она упрощает сетевое оборудование в узлах и управление сетью. В частности IP-маршрутизатор ограничивается только сведениями о наличии или отсутствии связей в пределах IP-сети и их пропускных способностей, без учета маршрута передачи сигнала в нижележащей сети, и используемых технологиях передачи.

Стоит обратить внимание и на используемые в сетях Ethernet технологию виртуальных сетей VLAN, которая позволяет на базе единой физической сети организовывать несколько наложенных Ethernet-сетей.

Другими примерами наложенных сетей применяемых в инфокоммуникационных сетях можно считать информационные сети наложенные поверх сети IP. В свою очередь сеть Ethernet можно

рассматривать как наложенную на сеть, образуемую структурированной кабельной системой.

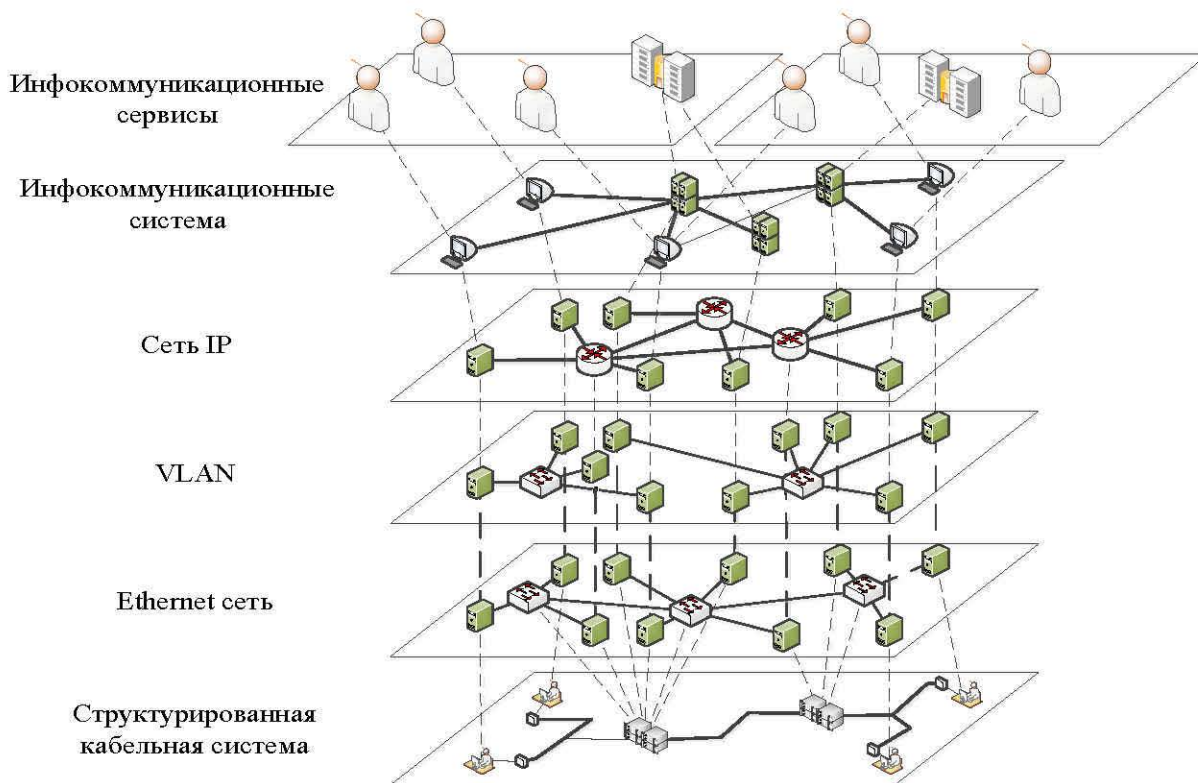


Рис. 1.1. Пример представления инфокоммуникационной сети как совокупности наложенных сетей

Телекоммуникационные сети, имеющие наложенную структуру могут иметь различные единицы передаваемой информации на разных ее уровнях, различные принципы формирования групповых потоков. Так, например, на уровне сети WDM потоки передаются в виде светового пути, для сети АТМ это ячейка, для IP – сети это пакет, если поверх стека наложенных сетей организовывается телефонная сеть, то это телефонный канал.

Современные сети являются мультисервисными, то есть позволяют на базе одной сети предоставлять множество услуг. Каждая услуга при своем предоставлении выдвигает разные требования к структуре и функциональным характеристикам сети. Сеть предоставления услуг в свою очередь тоже можно рассматривать как наложенную сеть.

### 1.3. Анализ используемых методов структурного и параметрического синтеза современных телекоммуникационных систем

Формально, процесс проектирования структуры телекоммуникационной системы следует рассматривать как решение совокупности двух основных задач: задачи выбора структуры (структурного синтеза) и выбора числовых значений параметров заданной структуры, удовлетворяющих совокупности условий (параметрический синтез).

Суть задачи синтеза телекоммуникационной системы состоит в том, что при известных потоках требуется определить параметры элементов системы и определить ее структуру, так чтобы при соблюдении некоторых требований к характеристикам качества обслуживания она могла бы обслужить эти потоки. При решении данной задачи необходимо определить:

- какое количество узлов доступа необходимо установить;
- где необходимо установить узлы доступа;
- какой должна быть производительность и емкость этих узлов;
- как абоненты телекоммуникационной системы должны быть распределены по зонам обслуживания узлов доступа;
- каким образом абоненты телекоммуникационной системы должны соединяться с узлами доступа, а также, какой должна быть пропускная способность каналов связи;
- каким образом узлы доступа должны соединяться друг с другом или с центральным узлом, и какие значения пропускных способностей используемых каналов связи.

При развертывании инфокоммуникационной сети возникает необходимость строительства ее телекоммуникационной подсистемы в том числе и структурированной кабельной системы.

Решение задачи проектирования инфокоммуникационной сети состоит из двух стадий: архитектурной и телекоммуникационной [19]. На

архитектурной стадии определяются пути прохождения кабельных каналов, размещение технических помещений (кроссовых и аппаратных), рабочих мест пользователей сети. Эти задачи решаются при разработке проекта нового или реконструируемого здания специализированными проектными организациями. На телекоммуникационной стадии проектирования определяется структура кабельной системы, перечень и размещение коммуникационных устройств.

Кабельную систему здания, являющуюся основой кампусной сети, рекомендуется проектировать в соответствии с международными стандартами ISO/IEC 11801, TIA/EIA-568-A, задающими характеристики структурированной кабельной системы (СКС) [20]. В качестве топологии СКС рекомендуется использовать древовидную топологию. Узлами структуры являются технические помещения (кроссовые и аппаратные), которые соединяются друг с другом электрическими и оптическими кабелями.

Решение задачи планирования данного класса систем является сложной задачей, которой посвящено множество работ. Так, в работе [21] приведена формализация задачи синтеза оптимальной структуры кампусных сетей, которая учитывает большое количество технических, технологических и экономических параметров. При этом в работе не предложен метод решения данной задачи.

В направлении развития методов решения задачи синтеза оптимальных по стоимости топологии сетей масштаба предприятия существует ряд работ. В основном эти работы посвящены применению для решения данной задачи ранее известных методов синтеза сетей доступа с древовидной топологией [22,23]. Используемые подходы обычно базируются на декомпозиции решаемой задачи, а следовательно, решают задачу по частям, где результаты решения одной задачи являются исходными данными для следующей. Этот не гарантирует получения оптимального решения задачи в целом.

В процессе проектирования телекоммуникационных систем необходимо обеспечить согласованное решение ряда задач таких как выбор топологии, выбор пропускных способностей каналов связи, маршрутизации и распределения потоков [21,22].

Создание телекоммуникационных систем не является одномоментным, а представляет собой длительный многоэтапный процесс. Это сказывается на процессе проектирования и делает актуальными многоэтапные методы синтеза. Ряд многоэтапных методов синтеза телекоммуникационных систем рассмотрены в работах [21–25]. Так в работах [24,25] рассматривается задача структурного и функционального синтеза транспортной телекоммуникационной сети. Однако предложенный метод обладает недостатком связанным с тем, что решение задачи рассматривается как процесс поэтапного наращивания пропускных способностей каналов связи, но при этом не учитывается необходимость строительства линий связи и затраты на их строительство. Так же в работах не учитываются потоки между серверами возникающие при предоставлении услуг.

Другим аспектом на которое необходимо обращать внимание при структурно параметрическом синтезе сетей это периодическое изменение нагрузки в сети. По этому показателю задачи, которые возникают при синтезе и проектировании информационно-телекоммуникационных систем и сетей в зависимости от распределения трафика во времени, можно разделить на три группы: однопериодное планирование; планирование с несколькими пиками нагрузки и многопериодное планирование [23]. Обычно при планировании телекоммуникационных систем трафик в сети описывается с помощью единственной матрицы требований (которая базируется на измерении трафика и маркетинговых прогнозах), чтобы отразить пиковый трафик в течение дня.

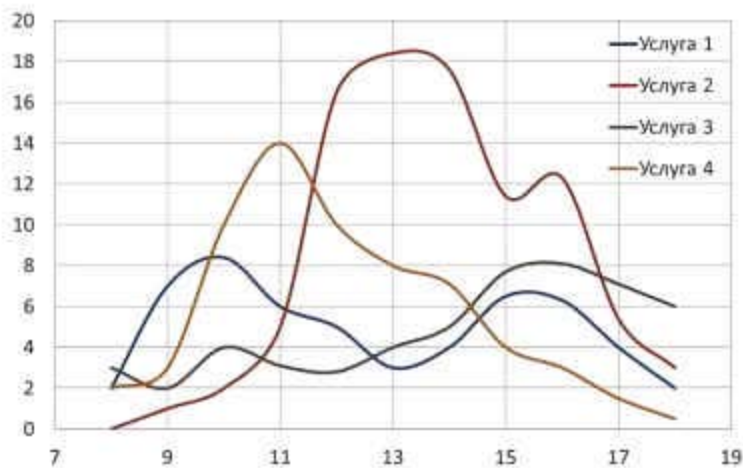


Рис. 1.2. Распределение нагрузки в инфокоммуникационной сети во времени

При планировании сети с несколькими пиками нагрузки трафик в сети описывается с применением нескольких матриц потоков для каждого пика нагрузки в течение некоторого периодического временного интервала, например, дня. Наличие нескольких пиков нагрузки в трафике наблюдается в том случае когда трафик создаваемый при предоставлении услуг в сети для разных видов услуг имеют пики в различные моменты времени, то есть пики нагрузки не совпадают.

#### 1.4. Анализ методов структурного и параметрического синтеза наложенных телекоммуникационных систем

Учет наложенной структуры современных сетей образованную наложенными сетями обычно достигается за счет последовательного решения задач синтеза для каждого из уровней отдельно с последующим использованием результатов синтеза одного уровня как исходные данные для остальных уровней, как, например, в работах [26,27]. Такой подход не учитывает взаимосвязи и взаимозависимости между уровнями и в результате не дает

Учет многоуровневой структуры телекоммуникационных систем, образуемой наложенными сетями, можно произвести за счет разделения системы на логическую и физическую сеть [26,28]. При использовании данного подхода топология логической и физической сети описывалась графом, после чего каждое ребро графа описывающего логическую сеть представлялась в виде потока протекающей по физической сети. Такой подход ограничен обычно двумя уровнями. В случае применения данного для структурно-параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей с большим количеством уровней решение задачи осуществляется за счет сведения к указанному выше двухуровневому случаю и последовательного синтеза каждого из уровней, когда результаты синтеза одного уровня сети используются как исходных данных для синтеза соседних уровней. Такой подход не гарантирует оптимального решения задачи в целом.

Учитывая все возрастающую структурную сложность современных инфокоммуникационных сетей, содержащих в своем составе совокупность наложенных сетей, возникла необходимость разработки новых эффективных моделей структурных свойств этого класса сетей. В связи с этим было предложены модели в виде многослойных сетей, которые можно считать дальнейшим развитием идеи разбиения сетей на логическую и физическую сеть [27,29]. В соответствии с этим подходом каждая наложенная сеть, входящая в состав описываемой системы, называется слоем. Каждый слой описывается графом, при этом множество вершин графа верхнего слоя является подмножеством вершин нижнего слоя. Для многослойной сети вводится дополнительное ограничение, что каждый канал верхнего слоя соответствует одному или нескольким путям в нижнем слое.

Методы решения задач структурного синтеза современных телекоммуникационных систем с применением модели многослойной сети, позволяющее совместно решать задачу синтеза структуры телекоммуникационной системы одновременно на нескольких ее уровнях

появились только не давно [27,30,31]. Например, в работе [32] предложен метод структурно-параметрического синтеза телекоммуникационных сетей MPLS с учетом эффекта статистического мультиплексирования, который позволяет решать задачу определения мест расположения узлов с коммутацией пакетов и оптимизации виртуальной топологии сети.

Недостаток модели многослойной сети проявляется при решении задач структурного и структурно-параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей и связан с тем, что данная модель не позволяет описывать структуру многоуровневой системы имеющей множественные связи между элементами разных уровней, а также потенциальные связи, которые необходимо учитывать при синтезе.

Для устранения данного недостатка можно использовать математическая модель современных телекоммуникационных систем, содержащих наложенные сети, предложенную Агеевым Д.В. [33,34], которая представлена в виде многослойного графа.

Телекоммуникационная система, содержащая наложенные сети, описывается с помощью многослойного графа  $MLG = (\Gamma, V, E)$  (Рис. 1.3), который включает в свой состав подграфы  $\Gamma^l = (V^l, E^l)$ . Подграф  $\Gamma^l$  описывает структуру сети на уровне  $l$ . Подграф  $\Gamma^0 = (V^0, E^0)$  содержит вершины и ребра, которые обеспечивают связь подграфов  $\Gamma^l$  между собой. Таким образом можно записать:  $\Gamma = \bigcap_{l=0} \Gamma^l$ .

На структуру графа  $MLG = (\Gamma, V, E)$  накладывается дополнительное ограничение, которое заключается в том, что для каждого ребра  $e^l = (i, j)^l$ ,  $e^l \in E^l$  подграфа  $\Gamma^l$  существует путь  $\pi = (v_i^l, \dots, v_j^l)$  между вершинами  $v_i^l$  и  $v_j^l$ ,  $v_i^l, v_j^l \in V^l$  проходящий через подграф более низкого уровня:  $\exists v_m^n \in \pi$ ,  $v_m^n \in V^n$ ,  $n < l$ . Данное правило не выполняется только для подграфа самого нижнего уровня,  $l = 1$ .



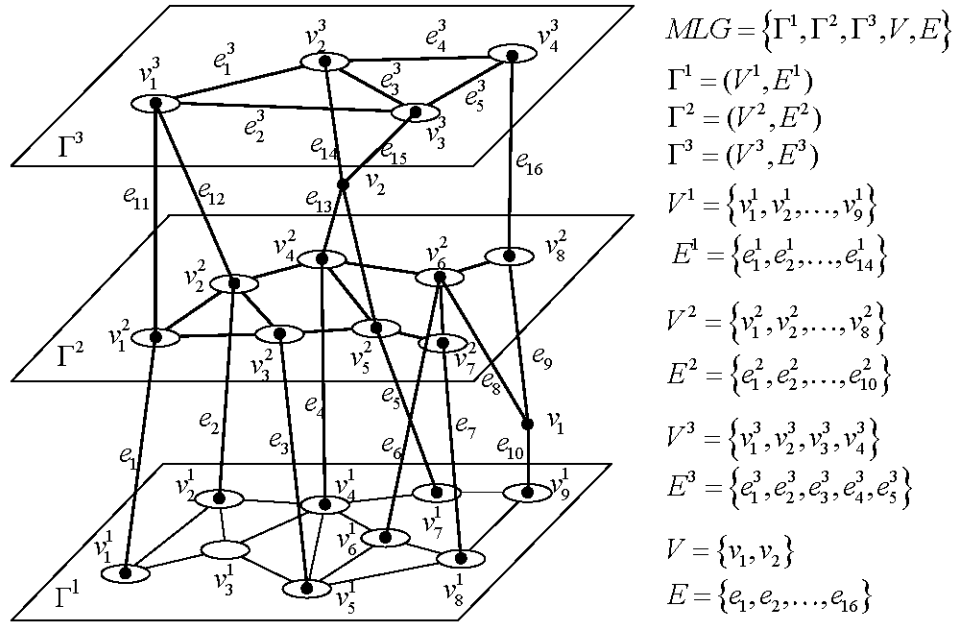


Рис. 1.3. Структура многослойного графа

В работе авторов [35,36] предложена методика описания современных телекоммуникационных систем имеющих многоуровневую структуру образованную наложенными сетями. Описание телекоммуникационных систем многослойными графами позволяет учитывать свойства многослойных сетей. С помощью этой модели впервые удалось отобразить логические и физические связи, имеющие место в реальных телекоммуникационных системах, что позволило учесть эти связи при проектировании систем в целом, как единый целостный объект.

Подход, базирующийся на использовании при решении задач структурно-параметрического синтеза современных мультисервисных сетей, имеющих в своем составе наложенные сети, моделей представленных в виде многослойного графа был применен для решения ряда задач. Так в работе [37] решена задача синтеза оптической телекоммуникационной сети с оптическими конверторами за счет использования модели многослойного графа с представлением оптической сети как совокупности графов. С использованием аналогичного подхода в [38] предложен метод решения

задачи структурно-параметрического синтеза мультисервисной телекоммуникационной сети содержащей в своем составе IP-сеть, наложенную на сеть MPLS, которая в свою очередь была наложенной на сеть WDM. Использование модели в виде многослойного графа позволило представить синтезируемые мультисервисные телекоммуникационные системы как единый целостный объект и решить задачу одновременного синтеза каждой из наложенных сетей, что повысило, как показали исследования, эффективность решения задачи синтеза по экономическим и техническим показателям.

### 1.5. Анализ свойств трафика, передаваемого в инфокоммуникационных сетях

Проведенные исследования мультисервисного трафика [39–41] показали несоответствие моделей классической теории телетрафика реальным свойствам трафика, что оказывает существенное влияние на процесс проектирование инфокоммуникационных сетей и управление трафиком в них. На данный момент наиболее корректными моделями считаются модели самоподобных процессов. Причиной возникновения самоподобия трафика считается применение протоколов управления потоком, который приводит к возникновению корреляции длин очередей в буферах узлов.

Понятие самоподобия тесно связана с понятием фрактала. По определению [42] фрактал — это структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому. Стохастические фрактальные процессы характеризуются набором взаимосвязанных параметров [43] (Рис. 1.4).

Математически фрактал это объект, обладающий дробной размерностью, определяемой как  $d = (\log N) / (\log \frac{1}{r})$ , где  $N$  - количество равных частей, на которые нужно разбить объект, а каждая часть будет уменьшенной копией целого в  $\frac{1}{r}$  раз.

Самоподобным процессам характерно [40,44]:

- медленно затухающая дисперсия;
- наличие долговременных зависимостей;
- наличие распределения с тяжелыми хвостами.

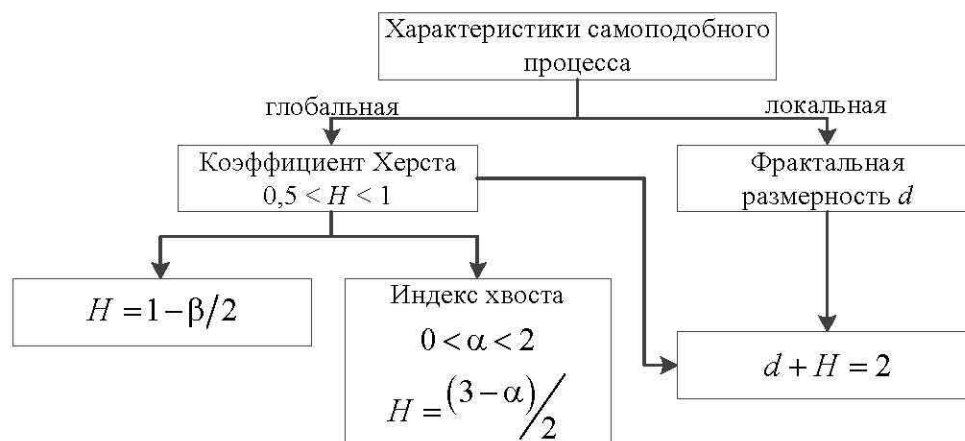


Рис. 1.4. Связь между параметрами самоподобного процесса

Наиболее значимым параметром самоподобного процесса является коэффициент Хэрста, который является индикатором степени самоподобия процесса. В работе [41] приведен обзор различных методов оценки параметров Хэрста по экспериментально полученным реализациям случайных процессов.

С момента выявления самоподобных свойств трафика накопился достаточный объем исследований направленный как на классификацию трафиков, так и выбор математических моделей (аналитических и с целью имитации).

Так обзору самоподобных точечных процессов, которые позволяют синтезировать реализации самоподобного трафика при имитационного моделировании, посвящена работа [45], где предложены модели фрактального дробового точечного процесса, фрактального ON/OFF источника, фрактальный биномиальный процесс.

На основе анализа накопленного объема исследований трафика в IP сетях, в работе [46] приведена классификация трафика с сопоставлением им законов распределения. При этом выявилось, что наиболее распространенными являются три вида распределений: Парето, Вейбулла и логнормальное. Так для моделирования размеров передаваемых файлов, интервалов между запросами к web-ресурсам, трафика VoIP используется распределение Парето; для моделирования процессов поступления протокольных блоков FTP - распределение Вейбулла; интервалы между пакетами в ЛВС, время между вызовами в Call-центрах, размеры передаваемых файлов - логнормальное распределение.

#### 1.6. Применение математических моделей самоподобных процессов для анализа и синтеза мультисервисных телекоммуникационных систем

Существует серия работ посвященных исследованию степени влияния самоподобных информационных потоков на качество обслуживания в узлах сети. Данные работы можно разделить на две группы.

Первой группе принадлежат работы посвященные исследованию вероятностно временных характеристик обслуживания с использованием средств имитационного моделирования или за счет проведения натуральных экспериментов.

Так в работе [47] приведен обзор моделей фрактальных точечных процессов таких как: фрактальный ON/OFF источник, фрактальный дробовый точечный процесс, фрактальный биномиальный процесс. Данные модели позволяют создавать реализации самоподобных потоков в процессе имитационного моделирования.

Вторая группа работ посвящена исследованию качественных характеристик обслуживания с применением аналитических моделей.

В работе [43] на основе анализа большого числа работ по исследованию трафика в IP сетях приведена классификация трафика и каждому виду трафика сопоставлен закон распределения. В работе утверждается, что наиболее широко применяются три вида распределений: Парето, Вейбулла и логонормальное. Распределение Парето, в качестве распределения с тяжелым хвостом, используется для моделирования интервалов между запросами к web-ресурсам, размеров передаваемых файлов, трафика VoIP [44], [45]. Распределение Вейбулла применяется для моделирования процессов поступления протокольных блоков FTP. Логнормальное распределение, как самая ранняя модель самоподобного трафика используется для моделирования интервалов поступления пакетов в ЛВС, времени между вызовами в Call-центрах [46], размеров передаваемых файлов [44].

Таблица 1.4.

#### Законы распределения трафика на различных уровнях ТСП

Тип трафика	Уровень	Закон распределения	
		интервалов поступления	длин протокольных блоков
VoIP	Прикладной	Парето	Парето
FTP/ТСР	Транспортный	Парето	Вейбулла, логонормальное
SMTP/ТСР	Транспортный	Экспоненциальный	Экспоненциальный
HTTP/ТСР	Транспортный	Парето	Логонормальное, Парето
IP	Сетевой	Парето	Парето
Ethernet	Канальный	Парето	Парето
ATM	Канальный	FARIMA	Детерминированный

Особого внимания требует тот факт, что агрегирования потоков от нескольких источников, в случае, если хотя бы один из них обладает свойствами самоподобия, то свойствами самоподобия будут обладать и результирующий суммарный поток [47]. Объединение потоков от источников генерирующих трафик, описываемый процессом с бесконечной

дисперсией, приводит к самоподобному сетевому трафику, который стремится к трафику описываемому моделью фрактального броуновского движения. Самоподобие также сохраняется при объединении потоков и от однородных и от разнородных источников трафика.

В работе [48] проводится исследование характеристик объединенных потоков с эффектом самоподобия получено выражение позволяющее определить значение параметра Хэрста для случая два объединяемых потока обладают разными значениями данного параметра:

$$H = \max(H_1, H_2).$$

В работе [49], [50] используя модель системы массового обслуживания с асимптотически самоподобным входящим потоком, постоянным временем обслуживания, с заданным числом обслуживающих приборов и ограниченным объемом буферного устройства (т.е. модель G|D|m|N) получены верхняя и нижняя граница для вероятности потери сообщения. Для моделирования самоподобного входящего потока использовался ON/OFF источник с постоянной скоростью потока и длительностью периодов активности (ON-период) имеющих распределение типа Парето. Также в работе получено распределение для времени ожидания сообщения в очереди. Данные результаты могут использоваться для определения параметров АТМ коммутаторов при проектировании телекоммуникационных систем.

В работе [51, 52] используя модель фрактального броуновского движения в качестве модели самоподобного процесса получено выражение для вероятности превышения длины очереди заданной пороговой величины для обслуживающих устройств с бесконечным объемом буфера. При введении дополнительных упрощений в работе получено выражение для требуемого объема буферного устройства, обеспечивающее заранее заданное качество обслуживания по вероятности потерь.

Используя результаты работы [51] в диссертационной работе [46] получено выражение для среднего времени задержки сообщения в узле и среднее время задержки сообщения в сети. Данные выражения использовались в работе [46] для проверки выполнения ограничения на максимально допустимую среднесетевую задержку сообщения в сети при решении задачи параметрического синтеза для случая передачи в сети потоков с параметром Херста равном  $H=0,8$ . При этом, для решения задачи выбора пропускной способности каналов связи, использовался классический метод «квадратного корня» и не был предложен метод определения параметров потоков в каналах связи, получаемых при распределении потоков в сети, для случая самоподобных потоков.

В работе [52] используя модель фрактального броуновского движения получено выражения связывающее между собой такие параметры узла коммутации, как объем буферного устройства  $N_6$ , вероятность потери  $P$  сообщения и интенсивность обслуживания  $\mu$  с параметрами обслуживаемого самоподобного потока с параметрами  $\lambda$  - интенсивность поступления сообщений;  $\sigma^2$  - дисперсия процесса;  $H$  – параметр Херста. В результате получено выражение для требуемой величины интенсивности обслуживания, при которой обеспечивается заданное ограничение на допустимую вероятность потерь сообщений

$$\mu = \lambda + \left( H^H (1-H)^{(1-H)} \sqrt{-2 \ln(P)} \right)^{1/H} \sigma^{1/(2H)} N_6^{-(1-H)/H} \lambda^{1/(2H)}.$$

Анализ данного выражения показывает, что при самоподобных потоках производительность системы растет медленнее при увеличении емкости буферных устройств по сравнению с случаем для пуассоновских потоков.

В работе [53] с применением средств имитационного моделирования проведено исследование формулы Норроса для пропускной способности системы и подтверждено, что она справедлива при широком диапазоне

изменения входящих в нее параметров и рекомендуется инженерам для оценки пропускных способностей каналов связи. Однако приведенное выражение не позволяет учитывать временные затраты на передачу информационных потоков через сеть.

### 1.7. Общая постановка задачи диссертационного исследования

В последнее время наблюдается бурное развитие информационных технологий. Это развитие характеризуется постоянным ростом требований к эффективности инфокоммуникационных сетей, расширением их функциональных возможностей, что накладывает свой отпечаток на процесс проектирования. Именно от методов проектирования, от адекватности математических моделей, используемых при этом, зависят свойства и жизнеспособность будущей системы.

Инфокоммуникационные сетям также присущий наложен принцип построения. Процессы, протекающие на разных ее уровнях, оказывают сильное влияние друг на друга, и требует учета этого при проектировании. Использование моделей в виде многослойного графа, позволяет адекватно описывать топологии наложенных сетей и взаимосвязь процессов, протекающими в них, а также представить проектируемую систему, как единый целостный объект, что повышает эффективность решения задач синтеза наложенных сетей.

При решении задач параметрического синтеза необходимо учитывать наличие у трафика нескольких периодов нагрузки и статистических свойств отличных от принятых в классической теории телетрафика.

Указанные особенности процесса создания и развертывания современных инфокоммуникационных сетей, а также наложен принцип их построения требует проведения дополнительных исследований и пересмотра методов структурного и параметрического синтеза, используемого для их проектирования. В данной диссертационной работе



ставится задача разработки новых и совершенствовании существующих методов структурного и параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей с использованием моделей многослойных графов и представления потоков в сети как самоподобных процессов с целью использования их в ходе проектирования.

Для решения указанной научно-прикладной задачи необходимо решить следующие частные задачи.

- осуществление анализа теоретических результатов в области: структурного и параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей; математического моделирования трафика в сети; выявление путей достижения цели исследования;

- обоснование и осуществление выбора математических моделей для описания мультисервисного трафика на различных участках инфокоммуникационной сети, которые учитывают различные типы единиц данных в наложенных сетях и учитывают наличие свойства самоподобия;

- разработка метода параметрического синтеза инфокоммуникационной сети в условиях передачи Multicast трафика с использованием модели в виде многослойного графа;

- разработка метода структурного и параметрического синтеза инфокоммуникационной сети с несколькими периодами нагрузки;

- проведение числовых, имитационных и натурных экспериментов по исследованию адекватности математических моделей и эффективности предложенных методов синтеза и выработки практических рекомендаций по их применению.

## 1.8. Выводы по первому разделу

1. В общем случае, суть задачи синтеза инфокоммуникационной сети можно свести к следующей формулировке. При заданных входных потоках требуется определить параметры структурных элементов и синтезировать

такую структуру системы, которая при соблюдении некоторых требований к характеристикам могла бы обслужить эти потоки.

2. Современным телекоммуникационным и инфокоммуникационным сетям свойственна многоуровневая структура, образуемая наложенными сетями. Характеристики наложенных сетей, входящие в состав инфокоммуникационных сети тесно взаимосвязаны, что необходимо учитывать при проектировании. Это требует выбора адекватных математических моделей в процессе их синтеза. Наиболее перспективной моделью для этих целей является многослойный граф.

3. Характеристики трафика, передаваемого в инфокоммуникационных сетях, по своим характеристикам отличается от тех которые описываются классическими моделями теории телетрафика. Использование классических моделей в процессе параметрического синтеза дает зачастую не корректные результаты, что необходимо учитывать в процессе создания инфокоммуникационных сетей.

4. Разработка методов параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей, базирующихся на моделях самоподобного трафика требует предварительного решения таких частных задач: выбор моделей трафика для различных участков сети; разработка методов определения параметров агрегированного трафика; метод оценки качества обслуживания в условиях самоподобного трафика.

5. В результате возникает актуальная научно-прикладная задача, которая состоит в разработке новых и совершенствовании существующих методов структурного и параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей с использованием моделей многослойных графов и представления потоков в сети как самоподобных процессов с целью использования их в ходе проектирования.

## РАЗДЕЛ 2

### РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРАФИКА В НАЛОЖЕННОЙ ИНФОКОМУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

#### 2.1. Особенности параметрического синтеза мультисервисных инфокоммуникационных сетей

При решении задач параметрического синтеза, в многих случаях, необходимо учесть нелинейный характер зависимости качества обслуживания потоков от их интенсивности. В этом случае необходимо установить связь в виде аналитических выражений между параметрами передаваемых потоков и параметрами качества обслуживания.

Как показали многочисленные эксперименты, наличие у передаваемых через сеть потоков свойств самоподобия оказывает большое влияние на эффективность работы сети. Особенно важную роль это играет при параметрическом синтезе телекоммуникационных систем, обеспечивающих передачу мультимедийного трафика и трафика реального времени.

Использование для моделирования трафика в мультисервисных сетях моделей самоподобных процессов в целях параметрического синтеза, выдвигает необходимость решения следующих частных задач:

- выбор математических моделей потоков на различных участках и уровнях мультисервисных телекоммуникационных систем;
- разработка методов определения параметров агрегированных потоков, образуемых при объединении потоков, поступающих на обработку в узел сети или совместно передаваемых в общем канале связи;
- определения расчетных выражений, позволяющих связать между собой параметры качества обслуживания с параметрами передаваемых и обслуживаемых потоков.

Перед решением поставленных задач дадим определения и рассмотрим основные свойства самоподобных процессов.

## 2.2. Определения и основные свойства самоподобных процессов

К числу основных понятий, определяющих свойства фрактальных процессов, относятся: самоподобность (Self-Similarity), долговременная зависимость, медленно затухающая дисперсия, бесконечные моменты, распределения с «тяжелыми хвостами» [53]. Дадим определения и рассмотрим основные свойства самоподобных процессов.

Рассмотрим дискретный во времени случайный процесс вещественной переменной или временной ряд  $\xi(t), t \in Z$ , где  $\xi(t)$  интерпретируется как объем трафика (измеряемый в пакетах, байтах или битах) в интервале  $(0, t]$ .

Определение 2.1. [53]

Считается, что случайный процесс вещественной переменной  $\{\xi(t), t \in \Upsilon\}$  является стационарно инкрементальным если

$$\{\xi(t + \Delta t) - \xi(\Delta t), t \in \Upsilon\} \stackrel{d}{=} \{\xi(t) - \xi(0), t \in \Upsilon\}, \quad \forall \Delta t \in \Upsilon, \quad (2.1)$$

где  $\stackrel{d}{=}$  означает равенство в смысле эквивалентности конечномерных распределений.

Последовательность приращений для  $\{\xi(t), t \in \Upsilon\}$  в дискретные моменты времени определяется как  $\zeta(t) = \xi(t+1) - \xi(t), t \in \Upsilon'$ . При моделировании трафика в сети будем считать процесс  $\zeta(t)$  стационарным в широком смысле, накладывая ограничения, что корреляционная функция  $R(t_1, t_2) = M[(\zeta(t_1) - \bar{\zeta})(\zeta(t_2) - \bar{\zeta})]$  является инвариантной относительно сдвига, т.е.  $R(t_1, t_2) = R(t_1 + k, t_2 + k), \forall t_1, t_2, k \in \Upsilon'$ . Предполагая, что первые два момента существуют и конечны, обозначим математическое ожидание и дисперсию соответственно как:

$$\bar{\zeta} \cong M[\zeta(t)] < \infty, \quad (2.2)$$

$$\sigma^2 \cong M[(\zeta(t) - \bar{\zeta})^2] < \infty. \quad (2.3)$$

Используя условие стационарности  $R(t_1, t_2) = R(t_1 - t_2, 0)$ , обозначим корреляцию  $R(k)$  и коэффициент корреляции  $r(k)$  как:

$$R(k) \cong M[(\zeta(t+k) - \bar{\zeta})(\zeta(t) - \bar{\zeta})], \quad k \in \mathbb{Z}, \quad (2.4)$$

$$r(k) \cong R(k)/R(0) = R(k)/\sigma^2. \quad (2.5)$$

Отметим, что  $R(0) = \sigma^2$ ,  $r(0) = 1$ ,  $R(k) = R(-k)$  и  $r(k) = r(-k)$ .

Перед рассмотрением свойств самоподобного процесса дадим определение агрегированного (объединенного) процесса :

$$\zeta^{(m)}(k) \cong \frac{1}{m} \sum_{t=m(k-1)+1}^{mk} \zeta(t). \quad (2.6)$$

То есть  $\zeta(t)$  разбивается на непересекающиеся интервалы размера  $m$ , их значения усредняются, и  $k$  используется в качестве индекса этих интервалов. Обозначим корреляционную функцию процесса  $\zeta^{(m)}(k)$  как  $R^{(m)}(k)$ . Используя предположение о стационарности в широком смысле, приходим к следующим определениям самоподобности второго порядка.

Определение 2.2.

Процесс  $\zeta(t)$  является точно самоподобным второго порядка с параметром Херста  $H$  ( $0,5 < H < 1$ ) если

$$R(k) = \frac{\sigma^2}{2} \left[ (k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H} \right], \quad \forall k \geq 1. \quad (2.7)$$

Процесс  $\zeta(t)$  является асимптотически самоподобным второго порядка с параметром Херста  $H$  ( $0,5 < H < 1$ ) если

$$\lim_{m \rightarrow \infty} R^{(m)}(k) = \frac{\sigma^2}{2} \left[ (k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H} \right], \quad \forall k \geq 1. \quad (2.8)$$

Следует также отметить, что выражение (2.7) подразумевает  $R(k) = R^{(m)}(k), \forall m \geq 1$ . Самоподобность второго порядка означает, что корреляционная структура точно (условие (2.7)) или асимптотически (условие (2.8)) сохраняется при агрегировании временного ряда. Самоподобие второго порядка (точное или асимптотическое) является основной структурой для моделирования трафика в сети.

Рассмотрим кумулятивный процесс  $\xi(t)$  в непрерывном времени  $t \in \Upsilon$

Определение 2.3.

Процесс  $\xi(t), t \in \Upsilon$  является самоподобным с параметром Херста  $H$  ( $0,5 < H < 1$ ), если для любого  $a > 0$  и  $t \geq 0$ ,

$$\xi(t) \stackrel{d}{=} a^{-H} \xi(at). \quad (2.9)$$

Таким образом процесс  $\xi(t)$  и его масштабированная версия  $\xi(at)$  после нормализации на коэффициент  $a^{-H}$  должны иметь идентичные распределения. В случае моделирования процессом  $\xi(t)$  суммарного трафика в системе до момента времени  $t$ , параметр  $a$  является масштабным коэффициентом. При  $a > 1$  единичный интервал времени удлиняется, сжимающий коэффициент  $a^{-H}$  применяется для того чтобы сделать величины  $\xi(at)$  сопоставимыми с  $\xi(t)$ . При  $a < 1$ , обратное утверждение тоже справедливо. В то время как параметр  $a$  изменяется, показатель

степени остается инвариантным. Для процесса  $\xi(t)$  справедливы следующие закономерности [53]

$$\xi(t) \stackrel{d}{=} t^H \xi(1), \quad (2.10)$$

$$M[\xi^2(t)] = \sigma^2 t^{2H}. \quad (2.11)$$

Процесс приращений  $\zeta(t)$  для кумулятивного процесса  $\xi(t)$  связан с агрегированным процессом  $\zeta^{(m)}(t)$  следующим образом:

$$\begin{aligned} \zeta^{(m)}(t) &= \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \zeta(t) = m^{-1} (\xi(m) - \xi(0)) \stackrel{d}{=} \\ &= m^{-1} m^H (\xi(1) - \xi(0)) = m^{H-1} \zeta(t). \end{aligned} \quad (2.12)$$

Таким образом, если  $\xi(t)$  - самоподобный процесс со стационарным инкрементом, то для его процесса приращения справедливо следующее выражение:

$$\zeta(t) \stackrel{d}{=} m^{1-H} \zeta^{(m)}(t), \quad (2.13)$$

которое демонстрирует как процесс  $\zeta^{(m)}(t)$  связан с  $\zeta(t)$  через простое масштабирующее соотношение включающее параметр  $H$  в смысле конечномерного распределения. Выражения (2.7) и (2.8) явно устанавливает факт, что  $\zeta(t)$  и  $m^{1-H} \zeta^{(m)}(t)$  должны иметь точно или асимптотически такую же структуру второго порядка. В результате, мы можем дать определение точно и асимптотически самоподобного процесса.

Определение 2.4.

Процесс  $\zeta(t)$  дискретного времени  $t \in Z$  является точно самоподобным с параметром Херста  $H$  ( $0,5 < H < 1$ ) если

$$\zeta(t) \stackrel{d}{=} m^{1-H} \zeta^{(m)}(t), \forall m \geq 0. \quad (2.14)$$

Процесс  $\zeta(t)$  дискретного времени  $t \in Z$  является асимптотически самоподобным с параметром Херста  $H$  ( $0,5 < H < 1$ ) если

$$\zeta(t) \stackrel{d}{=} m^{1-H} \zeta^{(m)}(t), m \rightarrow \infty. \quad (2.15)$$

Дополнительно к рассмотренной выше статистической подобности при масштабировании эти процессы обладают другими количественными свойствами. Самоподобные процессы можно обнаружить по следующим равноценным признакам: медленно затухающая дисперсия; наличие долговременных зависимостей; наличие распределения с тяжелыми хвостами.

Свойство медленно затухающей дисперсии заключается в том, что дисперсия выборочного среднего затухает медленнее, чем величина, обратная размеру выборки, т.е.

$$D(\zeta^{(m)}(t)) = \sigma^2 m^{2H-2}, \quad m \rightarrow \infty, \quad (2.16)$$

в то время как для традиционных случайных процессов  $D(\xi^{(m)}(t)) = \sigma^2 m^{-1}$ , т.е. уменьшается обратно пропорционально объему выборки.

Наличие долговременной зависимости заключается в том, что самоподобный процесс обладает гиперболически затухающей корреляционной функцией

$$R(k) \cong k^{(2H-2)} L(k), \quad k \rightarrow \infty, \quad (2.17)$$

где  $L(k)$  – медленно меняющаяся функция на бесконечности (т.е.  $\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{L(kx)}{L(k)} = 1$  для всех  $x > 0$ ). Следовательно, корреляционная функция



является несуммируемой, и ряд, образованный последовательными значениями корреляционной функции, расходится

$$\sum_k R(k) = \infty. \quad (2.18)$$

Эта бесконечная сумма является еще одним определением долговременной зависимости, поэтому почти все самоподобные процессы являются долговременно зависимыми.

И наоборот процесс  $\zeta(t)$  кратковременно зависимым, если корреляционная функция суммируема

$$\sum_k R(k) = \text{finite} < \infty. \quad (2.19)$$

Свойство наличия распределения с тяжелым хвостом заключается в том, что случайная величина  $\xi$  имеет *распределение с тяжелым хвостом*, если

$$P[\xi > x] \sim c \cdot x^{-a}, \quad x \rightarrow \infty, \quad (2.20)$$

где  $0 < a < 2$  и называется параметром формы,  $c$  - некоторая положительная константа. В отличие от распределений с легкими хвостами, такими как экспоненциальное или гауссовское, которые имеют экспоненциальное убывание хвоста.

*Коэффициент Хэрста*, имеет принципиальное значение в теории самоподобных процессов. Он является индикатором степени самоподобия процесса. Для процессов обладающих эффектом самоподобия параметр Хэрста принимает значение  $0,5 < H < 1$ .

## 2.3. Математические модели потоков в мультисервисной телекоммуникационной системе

Как указывалось ранее для решения задач параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей необходимо произвести выбор математических моделей мультисервисных потоков передаваемых в сети. В рамках данной диссертационной работе, базируясь на проведенном анализе результатов исследований характеристик потоков, передаваемых в мультисервисных телекоммуникационных системах, информационные потоки рассматриваются как самоподобные процессы. При этом выделяется два вида потоков:

- индивидуальные потоки, поступающие от отдельных источников;
- групповые потоки, передаваемые в каналах связи, и являющиеся результатами объединения (агрегирования) индивидуальных потоков от большого количества индивидуальных источников.

### 2.3.1. Моделирование индивидуальных источников трафика в сети

Характеристики потока поступающего от индивидуального источника хорошо описываются моделью On/Off источника. Источник трафика, описываемый данной моделью представляет собой источник, который имеет два состояния: активное (On-период) и пассивное (Off-период) (рис. 2.1,а). В активном состоянии он выдает поток с постоянной скоростью  $\lambda_{On}$ . В пассивном состоянии трафик не передается (рис. 2.1,б).

Длительности периодов On и Off являются случайными величинами. Длительность интервала активности  $\tilde{\tau}_{On}$  опишем функцией плотности вероятности  $p_{On}(\tau)$ , функцией распределения  $P_{On}(\tau) = \int_0^{\tau} p_{On}(t) dt$ , комплементарной функцией распределения  $P^c_{On}(\tau) = 1 - P_{On}(\tau)$ , математическим ожиданием  $\bar{\tau}_{On} = M[\tilde{\tau}] = \int_0^{\infty} \tau p_{On}(\tau) d\tau$  и дисперсией

$\sigma_{\text{On}}^2 = M\left[(\tilde{\tau} - \bar{\tau})^2\right] = \int_0^{\infty} (\tau - \bar{\tau})^2 p_{\text{On}}(\tau) d\tau$ . Длительности интервалов пассивности описываются соответственно:  $p_{\text{Off}}(\tau)$ ,  $P_{\text{Off}}(\tau)$ ,  $P^c_{\text{Off}}(\tau)$ ,  $\bar{\tau}_{\text{Off}}$  и  $\sigma_{\text{Off}}^2$ .

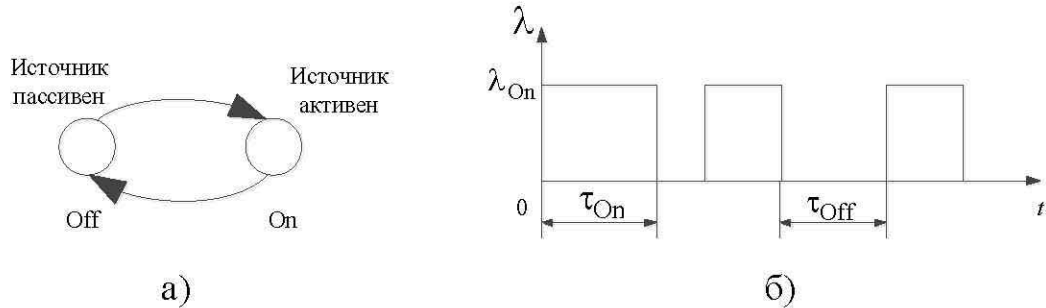


Рис. 2.1. Модель индивидуального источника трафика

Длительности интервалов могут иметь распределение с тяжелым хвостом, т.е. для периодов активности будет выполняться условие либо

$$P^c_{\text{On}}(\tau) \square l_{\text{On}} \tau^{-\alpha_{\text{On}}} L_{\text{On}}(\tau), 1 < \alpha_{\text{On}} < 2, \quad \tau \rightarrow \infty, \quad (2.21)$$

либо

$$\sigma_{\text{On}}^2 < \infty, \quad (2.22)$$

соответственно для периода пассивности – условие либо

$$P^c_{\text{Off}}(\tau): l_{\text{Off}} \tau^{-\alpha_{\text{Off}}} L_{\text{Off}}(\tau), 1 < \alpha_{\text{Off}} < 2, \quad \tau \rightarrow \infty, \quad (2.23)$$

либо

$$\sigma_{\text{Off}}^2 < \infty, \quad (2.24)$$

где  $l_{\text{On}} > 0$  и  $l_{\text{Off}} > 0$  - константы и  $L(\tau) > 0$  медленно меняющаяся функция на бесконечности такая, что  $\lim_{\tau \rightarrow \infty} L(a\tau)/L(\tau) = 1$ , для любого  $a > 0$ .

Отметим также, что математические ожидания  $\bar{\tau}_{\text{On}}$  и  $\bar{\tau}_{\text{Off}}$  для длительностей интервалов всегда конечны, а дисперсии  $\sigma^2 = \infty$ , когда  $\alpha < 2$ . Например, в качестве функции распределения может использоваться распределение Парето, то есть

$$P^c(\tau) = \begin{cases} b^\alpha t^{-\alpha}, & \tau \geq b > 0, 1 < \alpha < 2; \\ 0, & \tau < b, \end{cases} \quad (2.25)$$

или экспоненциальное. Заметим также, что функции распределения  $P_{\text{On}}(\tau)$  и  $P_{\text{Off}}(\tau)$  могут быть разными для длительностей активного и пассивного периода. Так одно из распределений, например, может иметь конечную дисперсию, в то время как другое – бесконечную.

Таким образом, описанная модель позволяет моделировать широкий класс информационных потоков создаваемых абонентскими терминалами при предоставлении телекоммуникационных услуг.

При описании с помощью приведенной выше модели потоков передаваемых в каналах связи между параметрами модели и параметрами канала связи существуют следующие закономерности. Если поток, поступающий в узел сети описывается моделью On/Off источника, скорость потока производимого источником в активном состоянии  $\lambda_{\text{On}}$  равна пропускной способности входящего канала связи  $c$ , при этом объем данных (длина пакета) поступающий за период активности является инвариантом и определяется как

$$\iota = \lambda_{\text{On}} \bar{\tau}_{\text{On}}. \quad (2.26)$$

Средняя интенсивность потока создаваемого источником трафика определяется как

$$\lambda = \frac{\lambda_{\text{On}} \bar{\tau}_{\text{On}}}{\bar{\tau}_{\text{On}} + \bar{\tau}_{\text{Off}}}. \quad (2.27)$$

Описанная модель в дальнейшем будет использоваться для определения параметров потоков передаваемых в мультисервисной телекоммуникационной системе при решении задач параметрического синтеза и анализа качества обслуживания.

### 2.3.2. Моделирование группового трафика в инфокоммуникационной сети

Рассмотренная выше модель позволяет описать поток, поступающий от отдельных источников или их небольшой группы. При решении задач параметрического синтеза необходимо выбрать модель группового потока образуемого при объединении потоков поступающих от множества источников. По результатам, проведенных исследований для моделирования группового потока с эффектом самоподобия хорошо подходит модель базирующаяся на применении фрактального Броуновского движения. Кроме того следует отметить, что если потоки от индивидуальных источников трафика описываются моделью On/Off источника и длительность On-периода или Off периода имеет распределение с тяжелым хвостом, то результатом суперпозиции большого количества таких потоков будет поток, центрированная составляющая которого, описывается фрактальным Броуновским движением.

Фрактальное Броуновское движение это Гауссовский процесс с нулевым математическим ожиданием, стационарным приращением, дисперсией  $M[B_H^2(t)] = t^{2H}$  и корреляцией

$$M[B_H(t_1)B_H(t_2)] = \frac{1}{2} \{t_1^{2H} + t_2^{2H} - |t_1 - t_2|^{2H}\}. \quad (2.28)$$

Он является статистически самоподобным в том смысле, что  $\{B_H(at), t \geq 0\}$  имеет такое же конечномерное распределение как  $\{a^H B_H(t), t \geq 0\}$  для всех  $a > 0$ .

Фрактальный Гауссовский шум  $\{G_i, i \geq 1\}$  является приращением фрактального Броуновского движения, а именно

$$G_i = B_H(i+1) - B_H(i), i \geq 1. \quad (2.29)$$

Фрактальный Гауссовский шум является стационарным Гауссовским временным рядом с нулевым математическим ожиданием, чья автокорреляционная функция  $R(k) = M[G_i \cdot G_{i+k}]$  определяется как

$$R(k) = \frac{1}{2} \left[ (k+1)^{2H} - 2k^{2H} + |k-1|^{2H} \right], k \geq 0. \quad (2.30)$$

Важным свойством  $R(k)$  является то, что для нее выполняется условие

$$R(k): H(2H-1)k^{2H-2} \text{ при } k \rightarrow \infty, \quad (2.31)$$

когда  $H \neq 1/2$ . При  $H = 1/2$  автокорреляционная функция  $R(k) = 0, \forall k \geq 1$  и  $\{G_i, i \geq 1\}$  является белым шумом. В то же время при  $1/2 < H < 1$   $\{G_i, i \geq 1\}$  имеет положительную корреляцию и имеет долговременную зависимость. Параметр  $H$ , в этом случае, является мерой долговременной зависимости.

Для моделирования группового трафика в работе используется модель фрактального Броуновского трафика, предложенная Leland и др. [38] и использованная Норросом [51, 52] для получения выражений описывающих качественные характеристики обслуживания группового самоподобного потока в узлах сети.

С точки зрения моделирования группового трафика в каналах связи телекоммуникационной сети, фрактальный Броуновский трафик представляется как

$$\xi(t) = \lambda t + \sqrt{\zeta \lambda} B_H(t), \quad (2.32)$$

где  $\xi(t)$  интерпретируется как объем данных, поступивший в интервале  $(0, t]$ . Данная модель трафика была рассмотрена и проанализирована в большом количестве работ [47] и др. для различных технологий сетей с коммутацией пакетов и для различных телекоммуникационных услуг. Сравнение данной модели с характеристиками реального сетевого трафика показали, что модель фрактального Броуновского трафика плохо описывает трафик для малых интервалов промежутков времени, но хорошо подходит для описания трафика на средних и больших интервалах. Таким это свидетельствует, что реальный групповой трафик в сети не является строго самоподобным, он в большей степени проявляет свойства асимптотического самоподобия.

Модель фрактального Броуновского трафика имеет три параметра  $\{\lambda, \zeta, H\}$ , которые описывают такие характеристики реальных потоков как среднюю интенсивность потока  $\lambda$ , измеряемую в пакет/сек или бит/сек и которая является количественной характеристикой трафика, а так же параметры  $\zeta$  (пакет·сек или бит·сек) и безразмерная величина  $H$ , которые описывают качественные характеристики трафика. Параметр  $\zeta$  является коэффициентом дисперсии

$$\zeta = \sigma^2 / \lambda. \quad (2.33)$$

Данный параметр характеризует степень флуктуации потока относительно его среднего значения. Использование параметра  $\zeta$  вместо

дисперсии удобно тем, что при изменении параметра интенсивности потока  $\lambda$ , который может рассматриваться как изменение количества агрегированных однородных потоков, позволяет изменять параметр  $\lambda$ , оставляя при этом неизменными остальные два параметра.

Используемый в выражении (2.32) процесс  $B_H(t)$  - нормированное фрактальное броуновское движение с нулевым математическим ожиданием  $M[B_H(t)] = 0, \forall t$  и дисперсией  $D[B_H(t)] = |t|^{2H}, \forall t$ . Отметим, что  $B_H(t)$  является математическим объектом, не имеющим физической размерности и его аргумент  $t$  - тоже безразмерный. Поэтому при моделировании информационных потоков более корректно использовать  $B_H(t/t_u)$ , где  $t$  - физическое время, а  $t_u$  - единица измерения времени

Параметр  $H \in [1/2, 1)$  описывает степень самоподобия или степень долговременной зависимости, характеризуя тем самым корреляционные свойства моделируемого трафика. Отметим так же, что при  $H = 1/2$  фрактальное Броуновское движение вырождается в классическое Броуновское движение и процесс  $\xi(t)$ , при  $\zeta = 1$  совпадает с процессом диффузии известным из классической теории телетрафика.

Следует также отметить, что комбинация параметров  $\{\lambda, \zeta, H\}$  в полной мере описывает модель группового трафика, то есть использование данных параметров для оценки качественных параметров обслуживания потока в узлах сети приводит к тому, что любые два потока в сети, характеризуемые одинаковыми параметрами  $\{\lambda, \zeta, H\}$  имеют одинаковые параметры качества обслуживания.

#### 2.4. Определение параметров агрегированного трафика

Спецификой решения задач параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей является необходимость наличия методов,



позволявших определять результирующие параметры трафика после их объединения (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**), а также возможность оценки в аналитическом виде параметров качества обслуживания, такие как задержка в узле сети.

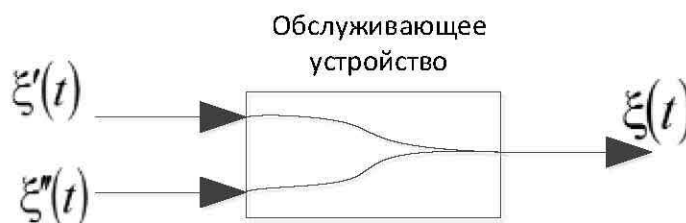


Рис. 2.2. Модель используемая для исследования агрегирования трафиков

Для оценки таких параметров как интенсивность  $\lambda$  и коэффициент дисперсии  $\varsigma$  можно использовать формулы математической статистики

$$\lambda = \sum_i \lambda_i \quad (2.34)$$

$$\varsigma = \frac{\sum_i \varsigma_i \lambda_i}{\sum_i \lambda_i}. \quad (2.35)$$

Отдельный интерес составляет значение параметра Херста для агрегированного трафика, которые на основе работ [47] можно определить как

$$H = \max_i (H_i), \quad i = 1, \dots, N. \quad (2.36)$$

Используя описанную модель Норрос получил выражения связывающие вероятность потерь, требуемую пропускную способность канала связи, среднюю длину очереди, объем буфера [46]. Базируясь на

результатах полученных Норросом можно записать следующие выражения для времени задержки пакета в узле  $\tau$  [53] и вероятности потери пакета из-за переполнения буфера  $P$  [53] при входном трафика с эффектом самоподобия

$$\tau = \frac{1}{c} \left[ 1 + \frac{\lambda^{2H-1/2(1-H)} \cdot c^{1/2(1-H)}}{(c-\lambda)^{H/1-H}} \right], \quad (2.37)$$

$$P = \exp \left[ \frac{(c-\lambda)^{2H}}{2k(H)^2 \zeta \lambda} \ell^{2-2H} \right], \quad (2.38)$$

где  $1$  - средняя длина пакета;

$$k(H) = H^H (1-H)^{1-H};$$

$\ell$  - емкость буфера.

Приведенные выражения (2.37) (2.38) справедливы в следующих условиях:

1) Трафик, поступающий на вход системы должен быть Гауссовым, то есть агрегированным от большого количества независимых источников интенсивность которых, на много меньше интенсивности группового потока.

2) Вывод формул базировался на использовании распределения Вейбулла для аппроксимации распределения длины очереди [48]. Это аппроксимация логарифмически точна для больших объемов буферных устройств, таким образом размер буфера должен быть большим для того, чтобы формула была адекватной.

При параметрическом синтезе фрагмента сети и его узлов обеспечивающих передачу групповых мультисервисных потоков приведенные выше условия выполняются, следовательно выражения (2.37) и (2.38) могут быть использованы для оценки качества обслуживания передаваемых потоков.

## 2.4. Определение параметров качества обслуживания в узлах сети под воздействием самоподобного трафика

Во время решения задач параметрического синтеза сетей часто возникает необходимость определения параметров качества обслуживания для трафика, генерируемого отдельными абонентами. Запросы от пользователей в этом случае передаются через сеть и поступают для обработки на сервер. Входящий поток поступающих запросов на обслуживание можно рассматривать как самоподобный, или в некоторых случаях - как пуассоновский. Время обработки запроса является случайной величиной, которая в большинстве случаев описывается распределением с "тяжелым хвостом". В этом случае не пригодны результаты, известные из классической теории телетрафика. Тем не менее, для решения задач проектирования сети необходимо найти выражения, которые позволяют связать параметры трафика с помощью вероятностно-временных параметров обслуживания запросов.

При моделировании трафика в сети часто используются такие законы, как распределение Парето, распределение Вейбулла, гамма или логонормальное. Среди наиболее часто используемых законов является распределение Парето. Однако, в реальных сетях интервалы между запросами и продолжительности обработки их сервера ограничены. В диссертационной работе предложено использовать ограниченный распределение, позволяет не меняя форму «хвоста» (то есть адекватно моделировать свойство самоподобия) указывает на максимальный интервал между запросами и продолжительностью обработки запроса на сервере. Она обеспечивает ограниченное значение индекса дисперсии  $\zeta^2$ . Коэффициент дисперсии в случае ограничений на распределения паретовского может быть определена как

$$\zeta^2 = \frac{(1-\alpha)^2(L^\alpha - k^\alpha)}{\alpha(Lk^\alpha - L^\alpha k)^2} \times \left( \frac{L^2 k^\alpha - L^\alpha k^2}{(2-\alpha)} - \frac{\alpha(Lk^\alpha - L^\alpha k)^2}{(1-\alpha)^2(L^\alpha - k^\alpha)} \right) \quad (2.40)$$

где  $L$  и  $k$  - соответственно, максимальное и минимальное возможное значение длительности интервалов времени.

Если процесс поступления пакетов отличается от пуассоновского, а распределение времени обслуживания – от экспоненциального (система типа  $G/G/m$ ), то можно воспользоваться результатами теории диффузионной аппроксимации [3]. Среднее значение числа пакетов в очереди  $\bar{N}_{оч}$  и среднее значение задержки  $\bar{\tau}$  в системе  $G/G/m$  могут быть определены как [3]:

$$\bar{N}_{оч} = P(\rho, m) \frac{\rho}{1-\rho} \frac{\zeta_{in}^2 + \zeta_{out}^2}{2}, \quad (2.41)$$

$$\bar{\tau} = \bar{\tau}_w + \bar{\tau}_s, \quad (2.42)$$

$$\bar{\tau}_w = P(\rho, m) \frac{\bar{\tau}_s}{m(1-\rho)} \frac{\zeta_{in}^2 + \zeta_{out}^2}{2}, \quad (2.43)$$

где  $\bar{\tau}_s$  - среднее время обслуживания пакета;

$\bar{\tau}_w$  - среднее время ожидания пакета в очереди;

$\zeta_{in}^2, \zeta_{out}^2$  - квадратичные коэффициенты дисперсии, соответственно для распределения интервала между поступлениями пакетов и времени обслуживания для  $G/G/m$ .

В работах [53], для расчета потерь в системах вида  $G/G/1/n$  при известных распределениях, описывающих вход поток и время обслуживания, предлагается использовать следующую приближенную формулу, полученную на основе диффузионной аппроксимации

$$P = \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{\frac{2}{\zeta_{in}^2 + \zeta_{out}^2} \ell + 1}} \rho^{\frac{2}{\zeta_{in}^2 + \zeta_{out}^2} \ell}, \quad (2.44)$$

где  $\ell$  - размер буфера;

$\rho$  - загруженность системы.

Как видно из (2.44), величина потерь в системе зависит от коэффициента вариации, рассматриваемого как основная характеристика потока и процесса обслуживания.

Рассмотрим некоторые частные случаи. Так для системы M/M/1, предполагающей, что интервал между поступлениями пакетов и время обслуживания пакетов распределено по экспоненциальному закону, коэффициенты дисперсии  $\zeta_{in}^2 = 1$  и  $\zeta_{out}^2 = 1$  и выражение (2.44) вырождается к известному из классической теории телетрафика результату

$$P = \frac{(1 - \rho)}{1 - \rho^{\ell + 1}} \rho^{\ell}. \quad (2.45)$$

Другим возможным вариантом является случай, когда на сервер услуг поступает поток заявок, который можно описать пуассоновским потоком, а время обработки не является распределенной по экспоненциальному закону. Данный случай можно рассматривать как систему массового обслуживания M/G/1. Соответственно, согласно формулы Полячека-Хинчина, среднее количество заявок в системе можно определить как:

$$\bar{N} = \rho + \rho^2 \frac{1 + \zeta_{out}^2}{2(1 - \rho)}. \quad (2.46)$$

Используя выражение (2.46), с применением формулы Литтла получаем выражение для определения среднего времени нахождения пакета в системе, описываемой моделью M/G/1

$$\bar{\tau} = \bar{\tau}_s + \frac{\rho \cdot \bar{\tau}_s (1 + \zeta_{\text{out}}^2)}{2(1 - \rho)}. \quad (2.47)$$

Таким образом, приведенные выше выражения (2.41) - (2.47) позволяют с использованием параметров, которыми описываются параметры индивидуальных источников определять основные параметры качества обслуживания такие как: вероятность потери и среднее время задержки.

Рассмотрим предложенные модели и сравним значения параметров качества обслуживания трафика в узлах сети.

Вначале мы исследуем задержку пакетов в узле для трафика, который имеет интервал между пакетами и времени обработки в узле, описанном распределениями Парето (модель P/P/1). Анализ результатов показал, что модель движения P/P/1 имеет большее значение задержки, чем задержки в случае M/M/1 трафика. Кроме того, увеличивается значения  $L$ , а затем увеличивается время ожидания в узле.

Далее, мы делаем сравнительный анализ задержек пакетов в сетевом узле в случае трафика, описывающие различные распределения времени обслуживания в узлах сети.

Результаты исследования показаны на графике, где на одной оси находится время ожидания, а на другой – использования узла для процесса логнормального распределения во времени, как Парето, Вейбулл, а также модели M/M/1, как показано на рис.2.4, б. . Анализ полученных результатов показывает, что максимальная задержка – это трафик с логнормальным распределением времени обслуживания. Распределение трафика Вейбулла

менее важна, чем задержка в случае распределения Парето. Минимальная задержка для случая трафика будет описываться в модели М/М/1.

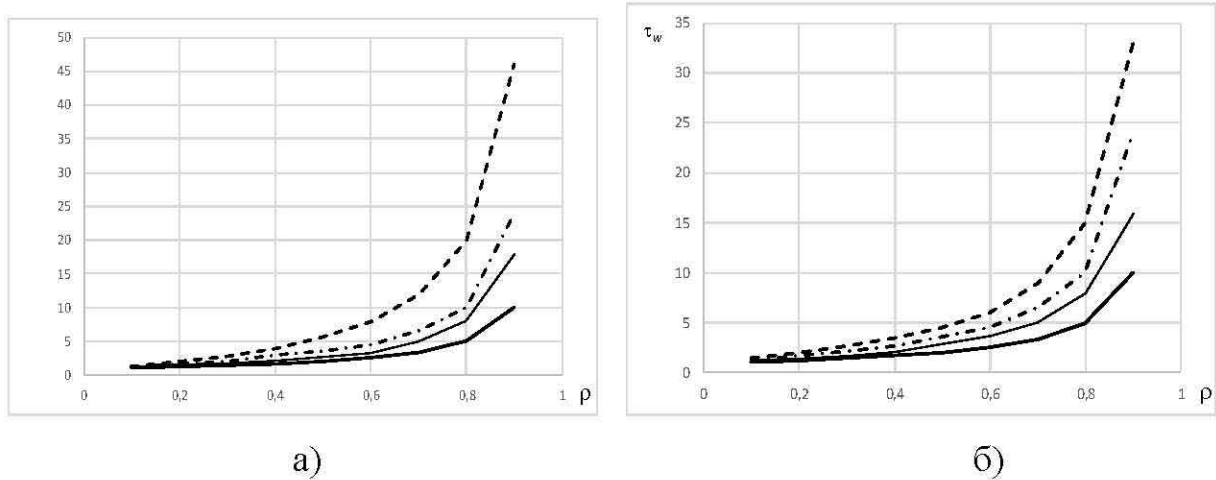


Рис. 2.4. Среднее время ожидания для различных типов трафика

Далее, мы делаем сравнительный анализ вероятности отбрасывания пакетов в сетевом узле в случае, когда трафик, показывает различные распределения во времени в узлах сети. Результаты исследования, видно на графике, где расположена на одной оси вероятность отбрасывания пакетов, а на другой – использования узла для логнормального распределения времени и обработки как, Парето, Вейбулла, а также модели М / М / 1, показанного на Рис.2.5.

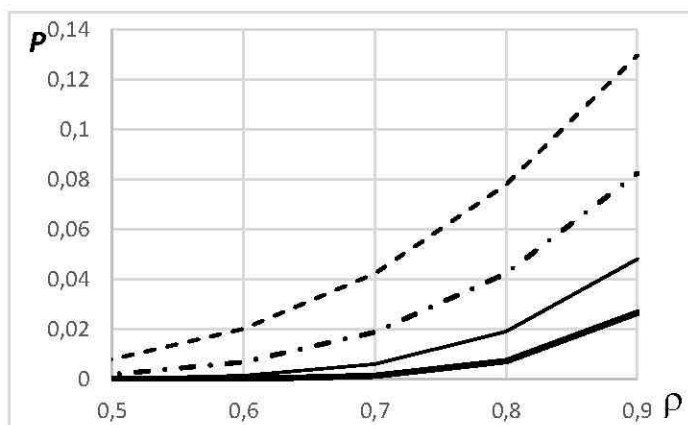


Рис. 2.5. Вероятность отбрасывания пакета для различных типов трафика

Экспериментальные результаты аналогичны предыдущим. Таким образом, максимальная вероятность отбрасывания пакета будет в случае, когда трафик имеет логарифмически нормальное распределение времени обработки. Трафик с распределением Вейбулла имеет меньшую вероятность отбрасывания пакета, чем в случае распределения Парето. Минимальная вероятность отбрасывания пакетов в случае трафика, который описывается в модели M/M/1.

## 2.5. Определение параметров качества обслуживания группового потока в узлах мультисервисной телекоммуникационной сети

Рассмотрим подробнее метод определения параметров качества обслуживания группового потока, образуемого при объединении большого количества потоков от отдельных источников трафика. Как уже ранее указывалось для моделирования группового потока в работе предлагается использовать модель фрактального Броуновского трафика. Применение данной модели группового потока позволяет получить выражения для оценки качественных параметров обслуживания с использованием модели узла сети как системы с накопителем, предложенной в работах [51, 52] Норросом. Указанная модель представляет собой систему с накопителем на вход которой, поступает поток, описываемый фрактальным Броуновским трафиком  $\gamma(\lambda, \zeta, H)$ , система имеет постоянную интенсивность обслуживания  $c$ , трафик, который не успевает обслужиться накапливается в накопителе. Это модель непрерывного времени, не описывает обработку отдельного пакета в системе, но позволяет получить параметры качества обслуживания трафика в узле для сетей, обеспечивающих передачу большого количества потоков, поступающих от источников трафика. Поведение модели описывается тремя процессами: процессом поступления, процессом накопления и процессом обслуживания. Опишем их.



Процесс поступления является фрактальным Броуновским трафиком и описывается процессом

$$\xi_{in}(t_1, t_2) = \lambda(t_2 - t_1) + \sqrt{\zeta\lambda} (B_H(t_2) - B_H(t_1)), \quad t_1, t_2 \in (-\infty, \infty), t_1 \leq t_2, \quad (2.48)$$

где параметры  $\{\lambda, \zeta, H\}$  являются параметрами фрактального Броуновского трафика описанными ранее. Мы так же можем записать

$$\xi_{in}(t) = \xi_{in}(0, t), \quad \forall t \geq 0, \quad (2.49)$$

$$\xi_{in}(t) = -\xi_{in}(t, 0), \quad \forall t \leq 0. \quad (2.50)$$

В этом случае  $\xi_{in}(t_1, t_2) = \xi_{in}(t_2) - \xi_{in}(t_1)$ .

Процесс накопления в системе с фрактальным Броуновским трафиком на входе описывается следующим образом

$$\xi_{st}(t) = \sup_{t_1 \leq t_2} (\xi_{in}(t_1, t_2) - c(t_2 - t_1)), \quad t \in (-\infty, \infty). \quad (2.51)$$

Так как  $B_H(t)$  имеет стационарное приращение, процесс  $\xi_{st}(t)$  является стационарным.

Процесс обслуживания в интервале  $(t_1, t_2]$  описывается как

$$\xi_{out}(t_1, t_2) = \xi_{in}(t_1, t_2) - \xi_{st}(t_2) + \xi_{st}(t_1), \quad (2.52)$$

$$\xi_{out}(t) = \xi_{out}(0, t), \quad \forall t \geq 0. \quad (2.53)$$

Из выражений (4.51) и (4.52) мы получаем, что

$$\xi_{out}(t) = \xi_{st}(0) + ct - \sup_{t_1 \leq t} (ct_1 - \xi_{in}(t_1)). \quad (2.54)$$

Используя описанную модель Норрос получил выражения связывающие вероятность потерь, требуемую пропускную способность канала связи, среднюю длину очереди, объем буфера [51, 52]. Базируясь на

результатах полученных Норросом можно записать следующие выражения для времени задержки пакета в узле  $\tau$  [51] и вероятности потери пакета из-за переполнения буфера  $P$  [52] при входном трафика с эффектом самоподобия

$$\tau = \frac{\iota}{c} \left[ 1 + \frac{\lambda^{2H-1/2(1-H)} \cdot c^{1/2(1-H)}}{(c-\lambda)^{H/1-H}} \right], \quad (2.55)$$

$$P = \exp \left[ \frac{(c-\lambda)^{2H}}{2k(H)^2 \zeta \lambda} \ell^{2-2H} \right], \quad (2.56)$$

где  $\iota$  - средняя длина пакета;

$$k(H) = H^H (1-H)^{1-H};$$

$\ell$  - емкость буфера.

Приведенные выражения (2.53) (2.54) справедливы в следующих условиях:

1) Трафик, поступающий на вход системы должен быть Гауссовым, то есть агрегированным от большого количества независимых источников интенсивность которых, на много меньше интенсивности группового потока [50].

2) Вывод формул базировался на использовании распределения Вейбулла для аппроксимации распределения длины очереди [51]. Это аппроксимация логарифмически точна для больших объемов буферных устройств, таким образом размер буфера должен быть большим для того, чтобы формула была адекватной.

При параметрическом синтезе фрагмента сети и его узлов обеспечивающих передачу групповых мультисервисных потоков приведенные выше условия выполняются, следовательно выражения (2.55) и (2.56) могут быть использованы для оценки качества обслуживания передаваемых потоков.

При параметрическом синтезе современных телекоммуникационных сетей важной характеристикой является обеспечение гарантии качества обслуживания между конечными узлами.

Решению данной задачи посвящена работа [47], в которой в качестве модели самоподобного потока в сети применялось фрактальное броуновское движение и получены аппроксимации для величины длины очереди и времени задержки для узла с дисциплиной обслуживания в порядке поступления. Результат был получен за счет введения огибающего процесса  $\hat{\xi}_{in}(t) = \lambda t + \eta \sigma t^H$ , который ограничивает процесс поступления  $\xi_{in}(t)$ . Однако в данной работе не приведены результаты, позволяющие определить вероятность, с которой данная величины задержки достигается.

Дальнейшее развитие данный подход получил в работе [48], что дало возможность одновременной с величиной задержки определять вероятность, что задержка не превысит заданного уровня. Последнее позволяет оценить необходимую величину выделяемой пропускной способности каналов связи для обеспечения гарантии на задержку пакета в сети между конечными узлами.

Дадим определение огибающего процесса. Пусть  $\xi_{in}(t)$  - fBM процесс описывающий входящий поток в узел сети. Процесс  $\hat{\xi}_{in}(t) = \lambda t + \eta \sigma t^H$  называется огибающим процесса  $\xi_{in}(t)$  с уровнем погрешности  $\varepsilon$  и длительностью  $\tau_b$  таким, что

$$P\{\xi_{in}(t) \leq \hat{\xi}_{in}(t), t = 1, 2, \dots, \tau_b\} \geq 1 - \varepsilon. \quad (2.57)$$

Для процесса описываемого моделью fBM

$$P\{\xi_{in}(t) \leq \hat{\xi}_{in}(t), t = 1, 2, \dots, \tau_b\} = P\{Z(t) \leq \eta t^H, t = 1, 2, \dots, \tau_b\}. \quad (2.58)$$

На практике для задания огибающего процесса нам необходимо определить значение параметра  $\eta$  для заданных параметров  $\varepsilon$  и  $\tau_b$ . В работе [48] значение параметра  $\eta$  предлагается определять из условия  $P\{Z(1) > \eta\} = \varepsilon / \tau_b$ , тогда можно записать

$$P\{\xi_{in}(t) \leq \hat{\xi}_{in}(t), t = 1, \dots, \tau_b\} \geq 1 - \tau_b P\{Z(1) > \eta\} = 1 - \varepsilon. \quad (2.59)$$

Использование огибающего процесса позволяет получить ценные для решения задач параметрического синтеза выражения для задержки пакета в узле сети с заданным уровнем гарантии. Ниже приведены выражения для двух часто используемых на практике дисциплин обслуживания такие как: обслуживание в порядке поступления и обслуживание с абсолютным приоритетом.

Рассмотрим первый случай. На узел сети с дисциплиной обслуживания в порядке поступления поступают  $n$  потоков, каждый из которых описывается процессом  $\xi_{in}^i(t) = \lambda_i t + \sigma_i Z(t)$ ,  $i = 1, \dots, n$ , огибающий процесс для входящего потока описывается процессом  $\hat{\xi}_{in}^i = \lambda_i t + \eta_i \sigma_i t^H$  с погрешностью  $\varepsilon$  и длительностью  $\tau_b$ , для длительности занятости системы  $\tau$  выполняется условие  $P\{\tau > \tau_b\} \leq p$ , тогда задержка пакета для  $i$ -го потока не превышает величины  $\hat{\tau}$

$$\hat{\tau} = \max_t \left\{ \frac{1}{c} \sum_{j=1}^n \hat{\xi}_{in}^j(t) - t \right\} \quad (2.60)$$

с вероятностью не меньшей чем  $(1 - p)(1 - \sum_{j=1}^n \varepsilon_j)$ , где  $c$  - пропускная способность канала.

Во втором случае на узел сети поступает  $n$  потоков и приоритеты обслуживания расставлены согласно индексов потоков. Процесс  $\hat{\xi}_{in}^i(t) = \lambda_i t + \eta_i \sigma_i t^{H_i}$ ,  $i = 1, \dots, n$  является огибающим для входящего потока,

описываемого процессом  $\xi_{in}^i(t) = \lambda_i t + \sigma_i Z(t)$  с погрешностью  $\varepsilon_i$  и длительностью  $\tau_b$ , для длительности занятости системы  $\tau$  выполняется условие  $P\{\tau > \tau_b\} \leq p$ , тогда задержка пакета для  $i$ -го потока не превышает величины

$$\hat{\tau}_i = \max_x \{S_i^{-1}(x) - \hat{\xi}_i^{-1}(t)\}, \quad (2.61)$$

с вероятностью не меньшей чем  $(1-p)(1 - \sum_{j=1}^i \varepsilon_j)$ , где  $\hat{\xi}_i^{-1}(x)$  и  $S_i^{-1}(t)$  обратные функции для  $\hat{\xi}_{in}^i(t)$  и  $S_i(t)$  соответственно, и

$$S_i(t) = \left\{ ct - \sum_{j=1}^{i-1} \hat{\xi}_{in}^j(t) \right\}^+, \quad (2.62)$$

где операция  $f^+$  над функцией  $f$  определяется как

$$f^+ = \begin{cases} f, & f > 0; \\ 0, & f \leq 0. \end{cases} \quad (2.63)$$

В телекоммуникационных сетях с установкой соединения трафик между конечными узлами передается по маршруту определяемого на этапе инициализации соединения. Кроме этого при решении задач параметрического синтеза телекоммуникационных сетей маршруты передачи потоков между конечными узлами считаются известными и обычно принимаются неизменными. Наличие точных данных о маршрутах передачи потоков между конечными узлами позволяет оценить задержку пакетов в сети, которая определяется как сумма задержек на каждом из узлов сети, содержащихся в маршруте передачи потока.

$$\hat{\tau}' = \sum_i \hat{\tau}_i. \quad (2.64)$$

При определении времени задержки пакета в сети мы можем воспользоваться теоремой 2.6, которая позволяет нам знать характеристики

потока в любом элементе телекоммуникационной сети. Так как самоподобный процесс моделируемый fBM является строго асимптотически самоподобным, то нам, в данном случае, достаточно определить параметр Херста потока на входе сети в остальных элементах его можно принять неизменным. Расчет времени задержки пакета в сети можно производить с использованием следующей теоремы [47, 48].

### Теорема 2.7.

Если маршрут передачи потока содержит  $N$  узлов и при обслуживании в узле  $z_i \in Z, i = 1, \dots, N$  возникает задержка не превышающая  $\hat{\tau}_i$  с вероятностью  $1 - p_i$ , тогда величина задержки между конечными узлами не превышает  $\hat{\tau}' = \sum_{i=1}^N \hat{\tau}_i$  с вероятностью  $p' = 1 - \sum_{i=1}^N p_i$ .

Задачи оценки времени задержки пакета в сети в этом случае решается с использованием следующей методики.

1. Определяем маршруты передачи потоков между всеми парами конечных узлов.
2. Определяем множество потоков совместно передаваемого в каждом из исходящих каналов связи для каждого из узлов сети.
3. Определяем задержку для каждого из узлов сети с использованием выражений (2.60) или (2.61) в зависимости от дисциплины обслуживания применяемой в узле сети.
- 4 Для каждого потока определяем задержку между конечными узлами с использованием выражения (2.64).

## 2.6. Методы параметрического синтеза мультисервисных наложенных телекоммуникационных сетей с применением математической модели многослойного графа

Рассмотренные выше методы параметрического синтеза применимы для случая однослойных сетей, которые не учитывают наложенной

структуры современных телекоммуникационных систем. Для рассматриваемых выше сетей и моделей, которые описывают процессы, происходящие в них, принималось, что тип протокольного блока не изменяется при передаче через сеть. Так, например, если источник трафика отправляет протокольный блок в виде последовательности пакетов, то считалось, что при дальнейшей передаче его через сеть он агрегируется в групповой поток и, пройдя по маршруту через телекоммуникационную сеть, доставляется узлу-получателю. При таком рассмотрении не учитывались процессы, параллельно происходящие на других уровнях (слоях) мультисервисной телекоммуникационной сети, такие как установка соединения, оказание информационной услуги сервером и другие, в целях которых производилась передача указанной последовательности пакетов.

Другим аспектом, на который следует обратить внимание, является то, что при постановке задач параметрического синтеза, для описания информационных потоков, поступающих в сеть обычно используется матрица требований передачи информации между конечными узлами сети. Однако при реализации инфокоммуникационной услуги абонент сети взаимодействует с некоторым множеством узлов управления услугой на разных уровнях семиуровневой модели ВОС, которую необходимо учитывать при синтезе мультисервисных наложенных сетей и которые не учитываются данным способом описания поступающего в сеть трафика.

Для устранения данного несоответствия, базируясь на модели, приведенной в работе [59], автором предлагается использовать при моделировании источников трафика в мультисервисных наложенных телекоммуникационных системах, следующую модель (рис. 2.9). Предлагаемая для моделирования источника трафика в мультисервисных наложенных сетях модель представляет собой многоуровневый On/Off – источник.

В этом случае параметры потока в состоянии активности для наложенной сети на уровне  $l$  могут быть рекуррентно определены через параметры смежных слоев:

$$\lambda_l = P_{\text{Off}}^l \lambda_{\min} + P_{\text{On}}^l \lambda_{l-1}, \quad (2.65)$$

$$\sigma_l^2 = P_{\text{Off}}^l (\lambda_{\min})^2 + P_{\text{On}}^l (\lambda_{l-1})^2 - (\lambda_l)^2, \quad (2.66)$$

где  $\lambda_l$  и  $\lambda_{l-1}$  - интенсивности потока на уровне  $l$  и  $l-1$  соответственно;

$P_{\text{Off}}^l$ ,  $P_{\text{On}}^l$  - вероятности нахождения источника в активном и пассивном состоянии соответственно;

$\sigma_l^2$  - дисперсия потока на уровне  $l$ .

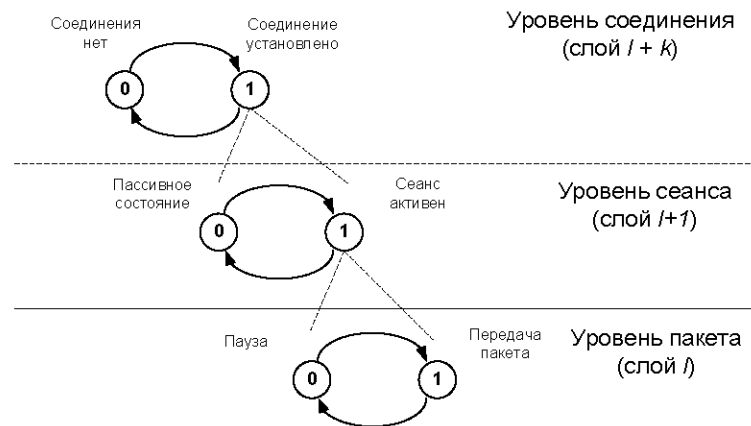


Рис. 2.9. Модель многоуровневого источника потока

Таким образом, применение предложенной выше модели многослойного источника позволяет производить оценку параметров потока от индивидуальных источников на разных уровнях наложенной сети (пакетная сеть, транспортная сеть, уровень предоставления услуг).

При решении задач параметрического синтеза наложенных телекоммуникационных сетей необходимо определять параметры структурных элементов на различных ее уровнях. Для решения данной задачи рекомендуется использовать следующую методику:

1. Синтезируемая мультисервисная наложенная сеть описывается многослойным графом согласно, приведенной во втором разделе методики.
2. Используя данные об абонентах, подключаемых к сети и перечне потребляемых ими телекоммуникационных услуг, производится определение параметров потоков, создаваемых ими на каждом из уровней наложенной сети. Для решения данной задачи применяется многоуровневая



модель источника описанная выше. Параметры модели On/Off – источника, используемого для описания телекоммуникационной услуги, потребляемой абонентов зависят от ее вида и ее характеристик на соответствующей уровне наложенной сети.

3. Потоки, поступающие от индивидуальных источников, агрегируются и определяются параметры группового трафика с использованием расчетных выражений (2.34)-(2.43).

4. Для полученной структуры сети решается задача распределения потоков с использованием предложенной в работе потоковой модели для многослойного графа. При применении потоковой модели следует использовать ее свойство сохранения значений интенсивностей потоков  $\lambda$ , описываемых моделями самоподобного трафика. В результате выполнения данного шага мы получим выражения для суммируемых потоков в ребрах многослойного графа.

5. С использованием расчетных выражений (2.49) - (2.51) и полученных выражений на шаге 4, формируются выражения для определения параметров агрегированных потоков, образуемых при объединении потока протекающих по ребрам многослойного графа.

6. Найденные на предыдущем шаге выражения используются в расчетных выражениях для параметров качества обслуживания для соответствующих ребер многослойного графа.

7. Полученные в результате выполнения описанных выше шагов выражения используются при математической постановке оптимизационной задачи, решение которой позволяет определить параметры, приписанные ребрам многослойного графа и как результат – значения параметров структурных элементов мультисервисной наложенной телекоммуникационной сети.

## 2.7. Выводы по второму разделу.

1. При синтезе мультисервисных телекоммуникационных сетей, одной из наиболее важных задач является обеспечение требуемого качества обслуживания, которое достигается при параметрическом синтезе. Методы параметрического синтеза позволяют использовать, как линейных, так и нелинейных модели и учитывать наличие функциональных и вероятностных зависимостей между параметрами передаваемых потоков и параметрами качества обслуживания.

2. Для разработки методики анализа и синтеза мультисервисных сетей в качестве математических моделей потоков на различных уровнях и участках мультисервисной наложенной телекоммуникационной сети использованы модели самоподобных процессов. Указанные модели позволяют учитывать такие свойства характерные потокам в мультисервисных сетях как: долговременную зависимость, высокую пачечность, наличие распределения с тяжелыми хвостами для межпакетных интервалов и длительностей занятий обслуживающих устройств, медленно затухающая дисперсия выборочного среднего.

3. Важной задачей при параметрическом синтезе мультисервисных телекоммуникационных систем является определение параметров потоков, получаемых при агрегировании потоков поступающих на обслуживание и совместно передаваемых по каналам связи. В работе получена система функциональных зависимостей, позволяющих определять параметры агрегированного потока для случая объединения потоков, описываемых такими моделями как: фрактальный Броуновский трафик, потоки от индивидуальных источников, потоки без эффекта самоподобия.

5. Предложенные в работе модели трафика являются основой для методов параметрического синтеза используемые в процессе проектирования, и являются обоснованием для выбора значений конфигурационных параметров телекоммуникационного оборудования в

узлах сети при планировании и эксплуатации инфокоммуникационных систем, а также составлении спецификаций, устанавливаемого оборудования, при развертывании новых и модернизации существующих инфокоммуникационных систем.

## РАЗДЕЛ 3

### МНОГОЭТАПНЫЙ СИНТЕЗ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

Этот раздел посвящен разработке методов структурно-параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей учитывающих наличие у нагрузки поступающей в сеть несколько периодов нагрузки.

3.1. Метод параметрического синтеза инфокоммуникационной сети с групповой адресацией

3.1.1. Общая характеристика решаемой задачи параметрического синтеза сети с групповой адресацией

Передача трафика с групповой адресацией (известный так же как multicast) это метод, который позволяет доставлять трафик от одного источника определенной группе абонентских узлов, называемых группой рассылки (multicast - группой). При реализации multicast доставки чаще всего используют пути, которые имеют древовидную структуру с созданием копий передаваемых сообщений в узлах ветвления дерева. Такой метод имеет то преимущество, что обеспечивается минимум количества копий сообщений, доставляемых группе рассылки.

Одной из сложных проблем, решаемых при реализации технологии передачи трафика является определение множества путей доставки информации от источника к каждому из абонентских узлов, которому предоставляется данная услуга, так чтоб обеспечивался минимум суммарных затрат на передачу. Совокупность данных путей образует дерево (иначе, учитывая возможность создания копий передаваемого сообщения, удаление ребра образующего цикл приводит к уменьшению суммарных затрат без потери функциональности). Данная проблема известна в иностранной литературе как multicast routing tree problem (MRT – Multicast Routing Tree problem). Однако, не смотря на большое количество

работ не известны методы точного решения задачи за полиномиальное время.

### 3.1.2. Математическая постановка задачи выбора маршрутов доставки трафика с групповой адресацией

Рассмотрим постановку задачи и математическую модель решения задачи нахождения путей доставки трафика с групповой адресацией, оптимальных согласно критерия максимума прибыли оператора сети.

Проектируемая телекоммуникационная система имеет иерархическую структуру и содержит сеть доступа, сеть агрегации доступа и магистральный сегмент. Магистральный сегмент соединяет каналами связи пограничные коммутаторы, которые обеспечивают подключение сети агрегации доступа в магистральный сегмент. В состав сети агрегации доступа входят узлы агрегации и узлы доступа. Сеть агрегации и магистральный сегмент имеет многосвязную топологию. К узлам доступа подключаются абоненты сети с использованием радиальной топологии. В состав сети входит узел – источник трафика с групповой адресацией, который передает информационный поток абонентским узлам составляющих группу рассылки.

Рассмотрим постановку задачи нахождения маршрутов доставки трафика с групповой адресацией согласно критерию минимума затрат.

Зададим исходные данные следующим образом:

$Z^{UN} = \{z_i^{UN}\}$  – множество абонентов сети – потребителей инфокоммуникационных услуг, составляющие группу рассылки;

$Z^{SN} = \{z_i^{SN}\}$  – множество узлов коммутации составляющих телекоммуникационную сеть;

$z^S$  – узел-источник трафика с групповой адресацией;

$Z = Z^{SN} \cup Z^{AN} \cup z^S$  – множество узлов сети.

Известна топология сети.

Заданными считаются удельные затраты на организацию пропускных способностей каналов с необходимым значением:

$D^Z = \|d_{ij}^Z\|$  – матрица приведенных затрат на передачу

информационного потока через канал связи  $(z_i, z_j)$ ;

Зависимость затрат на организацию пропускной способности канала связи заданной величины имеют линейную зависимость от их пропускной способности.

Трафик передаваемый между сервером и абонентами инфокоммуникационной сети считается известным и известны все его параметры.

Таким образом, ставится задача определить группу абонентов сети, которым предоставляется телекоммуникационная услуга, определить дерево маршрутов доставки информационного трафика от узла источника до абонентских узлов и выбрать пропускные способности каналов связи, так чтобы затраты на организацию сети были минимальны.

### 3.1.3. Выбор метода решения задачи

Для решения этой задачи в работе предлагается ее декомпозиция на две подзадачи: задача поиска места установки сервера и дерева маршрутов передачи трафика согласно критерию минимума стоимости сети (веса многослойного подграфа) с использованием линейной поточной модели и задача определения пропускных способностей каналов связи для самоподобного трафика при ограничении на величину задержки, которая не будет превышена с заданной вероятностью.

### 3.1.4. Постановка задачи синтеза с использованием математической модели многослойных графов

Построим математическую модель решения задачи с использованием многослойного графа.

В проектируемой сети можно выделить два слоя. Нижний слой описывает существующую топологию сети. В состав графа  $\Gamma^1 = (V^1, E^1)$  входят вершины соответствующие узлам сети  $V^1 = Z$ ; ребра графа  $E^1 = \{e_i^1\}$  соответствуют каналам связи проектируемой сети. Верхний слой описывает multicast группу. Граф  $\Gamma^2 = (V^2, E^2)$  содержит вершину  $v_0^2$  соответствующую источнику multicast трафика, остальные вершины  $v_i^2$  графа  $\Gamma^2$  соответствуют абонентам multicast – группы. Вершины  $v_i^2$  графа  $\Gamma^2$  соединяются с вершиной  $v_0^2$ .

Ребра, соединяющие слои между собой соединяют вершину  $v_0^2$  с вершинами,  $v_i^1$  в которых возможна установка оборудования предоставления услуг, которое является источником multicast трафика. Кроме этого ребра соединяют вершины соответствующие абонентам multicast – группы с вершинами нижнего слоя соответствующими узлам сети, где эти абоненты располагаются.

Ребрам нижнего слоя приписывается вес равный затратам на передачу multicast трафика по соответствующим каналам связи.

Решение поставленной задачи сводиться к нахождению кратчайшего связанного дерева с корнем в  $z^S$  покрывающего заданное множество узлов (множество  $Z^{UN}$ ), при этом во множество узлов покрываемых деревом могут включаться дополнительные узлы (множество  $Z^{SN}$ ).

Приведем математическую формулировку задачи.

Задано:

$MLG = (\Gamma, E)$  - исходный избыточный взвешенный МСГ, полученный согласно описанной выше методики.

Необходимо найти

$MLG'$  - МСГ являющийся подграфом исходного избыточного МСГ  $MLG$ , имеющий связанный граф на уровне 2 такой, что вес результирующего МСГ, определяемый как сумма весов ребер и вершин входящих в его состав, был минимальным.

$$\sum_{e_{ij}^1 \in E^1} \alpha(e_{ij}^1) \rightarrow \min. \quad (3.1)$$

$$MLG' = (\Gamma', E'), \quad \Gamma' = \{\Gamma^1, \Gamma'^2\}, \quad \Gamma^l = (V^l, E^l), \quad l = 1, 2, \\ \Gamma^l \subset \Gamma^l, \quad E^l \subset E^l, \quad E' \subset E. \quad (3.2)$$

$$\exists(e_i^l, e_j^l), \quad e_i^l, e_j^l \in E^l, \quad \forall i, j, v_i^l, v_j^l \in V^l, \quad \forall l = 2, \dots, |S| + 1. \quad (3.3)$$

Левая часть (3.1) определяет суммарный вес ребер графа  $\Gamma^1$ , описывающего нижний слой результирующего МСГ. Данная величина равна суммарным затратам на организацию каналов связи в проектируемой сети.

Условие того, что искомый МСГ  $MLG'$  является подграфом  $MLG$  формулируется в виде выражения (3.2).

Выражение (3.3) формулирует условие связности всех графов слоев выше слоя  $l = 1$ .

### 3.1.5. Метод решение подзадачи выбора мест установки сервера и выбора маршрута передачи группового трафика

Метод решения задачи (3.1)-(3.3) заключается в последовательном выполнении процедур преобразования исходного МСГ и решения частных задач на нем. Данный метод содержит следующие этапы:



М1.1. Уменьшение размерности решаемой задачи посредством преобразования графа  $\Gamma^1 = (V^1, E^1, \alpha)$  к сокращенному виду  $\Gamma_0^1 = (V_0^1, E_0^1, \alpha_0)$

М1.2. Преобразование неориентированного графа  $\Gamma_0^1 = (V_0^1, E_0^1, \alpha_0)$  к ориентированному реберно-взвешенному  $\Gamma_D = (V_D, E_D, \alpha^D)$  с искусственно введенной корневой вершиной.

М1.3. Формулировка задачи поиска дерева минимального веса в графе  $\Gamma_D = (V_D, E_D, \alpha^D)$ , как задачи целочисленного линейного программирования.

М1.4. Преобразование полученного решения задачи М1.3 в решение задачи (3.1)-(3.3).

Для уменьшения размерности решаемой задачи применяется подготовительный этап. Операции, выполняемые для уменьшения размерности классической задачи Штейнера, не подходят напрямую для решаемой задачи. Ниже приведен адаптированный вариант, построенный на базе процедур описанных в работе [55]. Суть данного этапа заключается в удалении вершин и ребер исходного графа, которые гарантировано, не входят в состав результирующего графа, а также выделение в составе графа заранее известных оптимальных конструкций и замена их на эквивалентные ребра и вершины с последующим обратным преобразованием в полученном решении модифицированной задачи.

Метод преобразования графа  $\Gamma^1$  к сокращенному виду  $\Gamma_0^1$  состоит из следующих шагов:

А2.1. Обозначим  $\phi_{ij}$  – длина кратчайшего пути между любыми вершинами  $v_i^1$  и  $v_j^1$ ,  $v_i^1, v_j^1 \in V^1$  (учитываются только веса ребер). Если  $\exists e_{ij}^1 = (v_i^1, v_j^1)$  такое, что  $\phi_{ij} < \alpha(e_{ij}^1)$ , тогда ребро  $e_{ij}^1$  может быть удалено из графа  $\Gamma^1$ .

A2.2. Рассмотрим вершину  $v \in V^{SN}$  со степенью  $\chi \geq 3$ , соединенную с вершинами из множества  $Adj(v) = \{v_1, v_2, \dots, v_\chi\}$ . Для любого подмножества  $V_K \subset V^1$ , обозначим как  $MST_\phi(V_K)$  кратчайшее связанное дерево для  $V_K$  с расстояниями  $\phi_{ij}$ . Если

$$MST_\phi(V_K) \leq \sum_{w \in V_K} \alpha(e_{vw}), \quad \forall V_K \subseteq Adj(v), \quad |V_K| \geq 3,$$

тогда степень вершины  $v$  в оптимальном решении должна быть равна нулю или двум. Таким образом, мы можем удалить вершину  $v$  из графа  $\Gamma^1$  и заменить каждую пару  $(v_i^1, v), (v, v_j^1)$  парой  $(v_i^1, v_j^1)$  добавлением нового ребра  $e_{ij}^1 = (v_i^1, v_j^1)$  со стоимостью

$$\alpha(e_{ij}^1) = \alpha((v_i^1, v)) + \alpha((v, v_j^1)),$$

или если ребро  $e_{ij}^1 = (v_i^1, v_j^1)$  уже существует, то присвоить ему стоимость

$$\alpha(e_{ij}^1) = \min \{ \alpha(e_{ij}^1), \alpha((v_i^1, v)) + \alpha((v, v_j^1)) \}.$$

A2.3. Если смежные вершины  $v_i^1, v_j^1 \in V^{AN}$  такие, что:

$$\alpha(e_{ij}^1) = \min_{e_{ik}^1} \alpha(e_{ik}^1),$$

тогда  $v_i^1$  и  $v_j^1$  могут быть объединены в одну вершину.

На шаге A2.1 из состава исходного графа  $\Gamma^1$  удаляются ребра вес которых больше суммарного веса ребер, входящих в кратчайший путь

между заданными вершинами. Это аналогично удалению из перечня каналов связи – кандидатов на использование их в составе сети, для которых организация прямого канала связи между узлами сети дороже использованию маршрута через транзитные узлы.

На шаге A2.3 производится поиск пар вершин, непосредственно связанных между собой, для которых ребро графа, связывающее их, имеет вес меньше чем любое другое инцидентное ребро, то эта пара вершин заменяется одной эквивалентной. Такая замена базируется на том, что если существуют пара абонентских узлов, которые могут непосредственно быть связаны каналом связи, а также если затраты на организацию данного канала связи меньше, чем для любого другого инцидентного канала связи, то в оптимальное решение задачи эти узлы будут входить парой и данный канал связи будет использоваться.

Полученный на предыдущем этапе сокращенный неориентированный реберно- и вершино-взвешенный граф преобразуем в реберно-взвешенный граф, с целью возможности использования ранее известных методов решения задачи поиска дерева Штейнера, адаптированных для данной задачи. В основу положен эффективный алгоритм решение задачи PCST (Prize Collection Steiner Tree Problem) с использованием метода ветвей и сечений (branch-and-cut) для ориентированного графа с корневой вершиной.

Преобразуем, полученный на подготовительном этапе M1.1 сокращенный граф  $\Gamma_0^1(V_0^1, E_0^1, \alpha_0)$  в ориентированный реберно-взвешенный граф  $\Gamma_D(V_D, E_D, \alpha^D)$  с использованием приведенных ниже операций.

A3.1. Включим в состав ориентированного графа  $\Gamma_D(V_D, E_D, \alpha^D)$   
 $V_D = \{v_i^D\}$ ,  $E^D = \{e_{ij}^D\}$ ,  $e = (v_i^D, v_j^D)$  все вершины графа  $\Gamma_0^1$  и искусственную корневую вершину  $v_r$ :

$$V_D = \left[ \bigcup_{i, v_i^1 \in V_0^1} v_i^D \right] \cup v_r.$$

А3.2. В состав множества дуг  $E_D$  графа  $\Gamma_D$  для каждого ребра  $(v_i^1, v_j^1)$  неориентированного графа  $\Gamma_0^1$ , которое связывает вершины, не являющиеся вершинами, соответствующими местам установки серверов, введем пару дуг  $(v_i^D, v_j^D)$  и  $(v_j^D, v_i^D)$ :

$$E^D = \bigcup_{i, j, (v_i^1, v_j^1) \in E_0^1, v_i^1, v_j^1 \notin V^{BN}} \left[ (v_i^D, v_j^D) \cup (v_j^D, v_i^D) \right].$$

А3.3. Для каждого ребра соединяющего вершину, соответствующую месту установки сервера, с другими вершинами графа  $\Gamma_0^1$  введем в состав множества дуг  $E_D$  графа  $\Gamma_D$  направленную дугу  $(v_i^D, v_j^D)$ :

$$E^D = E^D \cup \left[ \bigcup_{i, j, (v_i^1, v_j^1) \in E_0^1, v_i^1 \in V^{BN}, v_j^1 \in V_0^1 \setminus V^{BN}} (v_i^D, v_j^D) \right].$$

А3.4. Введем в состав множества  $E_D$  направленные дуги соединяющие корневую вершину  $v_r$  с вершинами соответствующими местам установки серверов:

$$E^D = E^D \cup \left[ \bigcup_{j, v_j^1 \in V^{BN}} (v_r, v_j^D) \right].$$

А3.5. Назначим дугам графа  $\Gamma_D$  веса:

$$\alpha^D(e_{ij}^D) = \begin{cases} \alpha_0(e_{ij}^0) & \forall (v_i^D, v_j^D) \in E^D, v_i^D \neq v_r; \\ 0 & \forall (v_r, v_j^D) \in E^D. \end{cases}$$

Для того чтоб найти решение задачи (3.1)-(3.3) необходимо найти подграф  $ST_D$  графа  $\Gamma_D$ , являющийся деревом с корнем в вершине  $v_r$ , при этом степень вершины  $v_r$  должна быть равна единице  $\chi(v_r) = 1, v_r \in ST_D$  (групповой трафик имеет единственный источник).

Сформулируем задачу поиска дерева Штейнера  $ST_D$  минимального веса в ориентированном графе  $\Gamma_D$  как задачу целочисленного линейного программирования (ЗЦЛП).

Введем вектор  $x \in \{0,1\}^{|E_D|}$  и  $y \in \{0,1\}^{|V_D|-1}$  следующим образом:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & (v_i^D, v_j^D) \in ST_D; \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad \forall (v_i^D, v_j^D) \in E_D;$$

$$y_i = \begin{cases} 1 & v_i^D \in ST_D; \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases}, \quad \forall v_i^D \in V_D, v_i^D \neq v_r.$$

Для того, чтобы результирующее дерево Штейнера  $ST_D$  было связанным необходимо в постановку ЗЦЛП ввести ограничение. Для этого введем понятие сечения отделяющую заданную вершину от корневой. В этом случае необходимым условием связности графа  $ST_D$  является условие существования дуги в графе  $ST_D$ , пересекающей данное сечение.

Обозначим множество  $V'_D$  вершин графа  $\Gamma_D$ ,  $V'_D \subset V_D$  и комплементарное множество  $\bar{V}'_D \subset V_D \setminus V'_D$  разделенные ориентированными сечениями:

$$\delta^+(V'_D) = \left\{ (v_i^D, v_j^D) \mid v_i^D \in V'_D, v_j^D \in \bar{V}'_D \right\} \quad \text{и}$$

$$\delta^-(V'_D) = \left\{ (v_i^D, v_j^D) \mid v_i^D \in \bar{V}'_D, v_j^D \in V'_D \right\}.$$

Задачу поиска минимального веса дерева Штейнера  $ST_D$  в ориентированном графе  $\Gamma_D$  можно записать следующим образом.

Дано:

$\Gamma_D(V_D, E_D, \alpha^D)$  - ориентированный реберно-взвешенный граф.

Критерий оптимальности:

$$\sum_{(v_i^D, v_j^D) \in E_D} \alpha^D(e_{ij}^D) x_{ij} \rightarrow \min. \quad (3.4)$$

Ограничения:

$$\sum_{(v_j^D, v_i^D) \in E_D} x_{ji} = y_i, \quad \forall v_i^D \in V_D \setminus \{v_r\}; \quad (3.5)$$

$$x(\delta^-(V'_D)) \geq y_k, \quad v_k \in V'_D, v_r \notin V'_D, \quad (3.6)$$

$$\forall V'_D \subset V_D;$$

$$\sum_{(v_r^D, v_i^D) \in E_D} x_{ri} = 1; \quad (3.7)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall (v_i^D, v_j^D) \in E_D; \quad (3.8)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad \forall v_i^D \in V_D \setminus \{v_r\}. \quad (3.9)$$

Условие (3.5) гарантирует, что степень входа для вершин результирующего дерева равна единице, тем самым, обеспечивается, что результирующий граф не будет иметь циклов и будет деревом.

Условие (3.6) гарантирует, что для каждой вершины  $v_i^D$  результирующего дерева  $ST_D$  существует ориентированный путь из корня  $v_r$  в  $v_i^D$ . Этим условием обеспечивается связность результирующего графа.

Условие (3.7) гарантирует, что степень корневой вершины равна единице, из чего следует, что только одна вершина из множества  $V^{EN}$  будет входить в результирующее дерево. Тем самым, проектируемая сеть

агрегации доступа будет подключаться в транспортную сеть посредством единого пограничного коммутатора.

Условия (3.8) и (3.9) гарантируют целочисленность аргументов  $x_{ij}$  и  $y_i$ .

Задача (3.4) – (3.9) решается с помощью пакетов математического моделирования, которые содержат алгоритмы решения задач целочисленного линейного программирования такие, как: MathLab, CPLEX, GLPK и д.р. В работе данная задача решалась с применением пакета ILOG CPLEX v.12.1.

Полученное в результате дерево Штейнера  $ST_D$  с использованием обратной процедуры преобразовывается в дерево  $T$ , являющегося подграфом исходного графа  $\Gamma^1$ , которое описывает топологию проектируемого фрагмента сети.

3.1.6. Метод решения подзадачи выбора пропускных способностей каналов связи для самоподобного трафика при известном распределении потоков

Согласно общему методу решения задачи следующим этапом после нахождения местоположения сервера услуг и распределения потоков в сети является выбор пропускных способностей каналов связи с учетом самоподобного характера трафика в инфокоммуникационной сети.

Исходными данными при решении данной подзадачи являются следующие.

Дано:

$U = \{u_i\}$  – множество абоненты инфокоммуникационной сети;

$z$  – сервер инфокоммуникационных услуг – источник группового трафика;

$G = \{g_i\}$  – множество сетевых узлов.

Известна топология сети с известным местоположением абонентских узлов  $u_i \in U$ , узлов коммутации и серверов  $z_i \in Z$ .

$B = \{b_{ij}\}$  – множество каналов связи в инфокоммуникационной сети, которые могут использоваться для передачи трафика, образуемого при предоставлении услуг абонентам, где  $b_{ij}$  – канал связи, связывающий узлы сети  $g_i$  и  $g_j$ .

Заданы удельные затраты на организацию пропускных способностей каналов с необходимым значением:

$d_{ij}$  – удельные расходы на обеспечение пропускной способности канала связи.

Заданы множество потоков с их характеристиками и маршрутами передачи между узлами отправитель – получатель (между абонентами и серверами и между серверами):

$M^j = \{\mu_i^j\}$  – множество трафиков возникающих в сети;

$(\alpha_i^j, \beta_i^j, \gamma_i^j, \alpha_i^j, H_i^j)$  – набор параметров самоподобного трафика

$\mu_i \in M^j$ ;

$\alpha_i^j, \beta_i^j$  – узлы получатель и отправитель для трафика  $\mu_i^j$ ;

$\gamma_i^j, \alpha_i^j, H_i^j$  – интенсивность, индекс дисперсии и значение параметра

Херста трафика  $\mu_i^j$ ;

Необходимо определить значения пропускных способностей каналов связи  $c_{ij}$  таким образом, чтобы задержка в сети не превышала заранее определенную величину  $T_{доп}$  с заданной вероятностью. Критерий оптимальности минимум суммарных затрат на организацию требуемых пропускных способностей каналов связи сети.

В качестве математической модели, используемой при решении данной подзадачи, будем использовать модель сети, в виде многослойного графа, синтезированного при решении предыдущей подзадачи.

Таким образом математическую модель задачи с использованием многослойного графа можно представить следующим образом.



Задано:

$MLG'$  - многослойный граф, описывающий структуру синтезируемой сети. Этот граф является результирующим подграфом исходного многослойного графа найденного при решении предыдущей задачи;

$d(e_{ij}^N)$  - удельные затраты на организацию канала связи единичной пропускной способности;

$Y = \{Y^s\}$  - множество потоков протекающих ребрами многослойного графа  $MLG'$ .

$(\gamma^s, \alpha^s, H^s)$  - параметры потока, протекающего ребрами многослойного графа  $MLG'$ .

Необходимо найти:  $c_{ij}^N, \forall e_{ij}^N \in E^N$  - пропускные способности ребер графа соответствующих каналам связи синтезируемой телекоммуникационной сети.

Распределение потоков и их маршруты передачи определены при решении предыдущей задачи.

Потоки протекающие ребрами  $e_{ij}^N$  графа телекоммуникационной сети  $\Gamma^N$  являются групповыми потоками, и для их моделирования применяется модель фрактального Броуновского трафика, характеризующегося набором параметров:  $\lambda_{ij}^s$  - интенсивность потока, бит/с;  $t_{ij}^s$  - средняя длина пакета, бит;  $\xi_{ij}^s$  - коэффициент дисперсии;  $H_{ij}^s$  - параметр Херста.

Обозначим как  $\gamma_{ij}^N$  - поток, протекающий по ребру графа нижнего слоя. Поток  $\gamma_{ij}^N$  образуется в результате объединения потоков, соответствующих потокам, протекающих по ребрам верхних слоев многослойного графа. Результатом решения предыдущей подзадачи нами было найдено дерево маршрутов передачи трафика с групповой адресацией,

что позволяет определить распределение потоков в синтезируемой сети.

Введем обозначение :

$x_{ij}^s$  - отображает факт протекания потока по ребру  $e_{ij}^N$  графа телекоммуникационной сети  $\Gamma^N$  можно записать:

$$\lambda_{ij} = \sum_s \lambda_k^s \cdot x_{ij}^s \quad (3.10)$$

$$H_{ij} = \max_s [H^s x_{ij}^s] \quad (3.11)$$

$$\xi_{ij}^s = \frac{\sum_s \lambda^s \cdot \xi^s \cdot x_{ij}^s}{\sum_s \lambda^s \cdot x_{ij}^s} \quad (3.12)$$

При решении задачи в работе использовалось модель фрактального броуновского движения. Таким образом на узел сети поступает совокупность трафика, где каждый из них описывается процессом  $\xi_{in}^s(t) = \lambda_s t + \sigma_s Z(t)$ , огибающий процесс для входящего трафика описывается процессом  $\hat{\xi}_{in}^s = \lambda_s t + \eta_s \sigma_s t^H$  с погрешностью  $\varepsilon$  и длительностью  $\tau_b$ , для продолжительности занятости системы  $\tau$  выполняется условие  $P\{\tau > \tau_b\} \leq p$ , тогда задержка пакета для  $s$ -го потока не превышает величины  $\hat{\tau}$

$$\hat{\tau} = \max_t \left\{ \frac{1}{c} \sum_j \hat{\xi}_{in}^j(t) - t \right\}$$

с вероятностью, не менее чем  $(1-p)(1 - \sum_j^n \varepsilon_j)$ , где  $c$  – пропускная способность канала. В этом случае в математическую модель задачи вводится ограничение

$$\sum_{(i,j) \in \pi^s} \hat{\tau}_{ij}^s \leq T_{\text{don}}^s, \quad \forall s,$$

$$1 - \sum_{(i,j) \in \pi^s} p_{ij}^s \leq P_{\text{don}}^s, \quad \forall s,$$

где  $\hat{\tau}_{ij}^s$  – задержка в канале  $(i, j)$   $s$ -го трафика;  $(1 - p_{ij}^s)$  – вероятность, что задержка в канале  $(i, j)$  не перевесит величину  $\hat{\tau}_{ij}^s$ .

Таким образом, основываясь на приведенной математической модели инфокоммуникационной системы, задачу параметрического синтеза сформулируем как оптимизационную задачу следующего вида.

Критерий оптимальности:

$$\sum_{e_{ij}^N \in E^N} d_{ij} \cdot c_{ij} \rightarrow \min. \quad (3.13)$$

Ограничения:

$$\lambda_{ij} = \sum_s \lambda^s \cdot x_{ij}^s \quad (3.14)$$

$$H_{ij} = \max_s [H^s x_{ij}^s] \quad (3.15)$$

$$\xi_{ij} = \frac{\sum_s \lambda^s \cdot \xi^s \cdot x_{ij}^s}{\sum_s \lambda^s \cdot x_{ij}^s} \quad (3.16)$$

$$\sum_{(i,j) \in \pi^s} \hat{\tau}_{ij}^s \leq T_{\text{don}}^s, \quad \forall s, \quad (3.17)$$

$$1 - \sum_{(i,j) \in \pi^s} p_{ij}^s \leq P_{\text{don}}^s, \quad \forall s, \quad (3.18)$$

$$c_{ij} = c_{ji}, \quad \forall e_{ij}^N \in E^N \quad (3.19)$$

$$\lambda_{ij}^1(t) < c_{ij}^1, \quad \forall e_{ij}^1 \in E^1, \forall t, \quad (3.20)$$

Задача параметрического синтеза (3.13) – (3.20) была решена с применением метода наискорейшего спуска, реализованный в среде MatLab.

3.2. Структурный и параметрический синтез инфокоммуникационной сети с несколькими периодами нагрузки

3.2.1. Общая характеристика синтезируемой инфокоммуникационной сети с несколькими периодами нагрузки

Инфокоммуникационные сети предназначены для обеспечения функционирования информационных систем и характеризуются большим разнообразием предоставляемых услуг. Это приводит к тому, что в сети передается трафик различной природы по своим характеристикам так и по требованиям к качеству обслуживания. Требования к качеству обслуживания принято описывать параметрами QoS. Кроме этого следует обратить внимание и на другой факт, а именно на то, что спрос на различные информационные и инфокоммуникационные услуги не одинаков во времени и обладает периодами роста и спадов. При этом образуется периодическое изменение нагрузки. В случае, если производительность сети недостаточная для обслуживания возросшей нагрузки, то это приводит к ухудшению качества обслуживания.

Традиционный подход, широко используемый до этого для односервисных сетей, базируется на расчете параметров сети для худшего случая, а именно, для часа наибольшей нагрузки, что обычно позволяет гарантировать удовлетворение требований по качеству обслуживания. Это подход, хоть и не позволяет получить решение эффективного использования сетевых ресурсов на всем продолжительности временного интервала, но хорошо себя зарекомендовал при планировании сетей.

В случае мультисервисного сетей с большим разнообразием трафика эта ситуация усугубляется тем, что обычно периоды максимальной нагрузки (час наибольшей нагрузки) для различных информационных и инфокоммуникационных услуг не совпадают. В этом случае традиционный подход, базирующийся на расчете для максимальной нагрузке (равной сумме максимальных нагрузок для каждой из услуг), так же само позволяет получить параметры и конфигурацию инфокоммуникационной сети удовлетворяющей требованиям к качеству обслуживания для любого периода времени, но эффективность использования сетевых ресурсов падает еще значительно.

При планировании инфокоммуникационных сетей, особенно с учетом колебаний интенсивности трафика на малых периодах времени, возникает необходимость в наиболее точном описании и моделировании трафиков, циркулирующих в сети. На данный момент наиболее корректными считаются модели самоподобных процессов, которые позволяют более точно, чем модели простейших потоков описать процессы, протекающие в современных мультисервисных инфокоммуникационных сетях.

В связи с этим возникает задача, решаемая в данной части диссертационной работы, суть которой заключается структурном и параметрическом синтезе инфокоммуникационных сетей с несколькими периодами нагрузки и с учетом самоподобного характера передаваемого трафика в сети.

### 3.2.2. Предметная постановка задачи синтеза инфокоммуникационной сети с несколькими периодами нагрузки

Проектируемая инфокоммуникационная сеть обеспечивает предоставление абонентам множества инфокоммуникационных услуг посредством соответствующих серверов. В процессе планирования данной сети необходимо определить места установки соответствующих серверов,

маршруты передачи трафиков услуг для каждого из периодов и пропускные способности каналов связи.

Исходными данными при решении задачи являются:

$U = \{u_i\}$  – множество абоненты инфокоммуникационной сети;

$S = \{s_i\}$  – множество инфокоммуникационных услуг, предоставляемых в сети;

$Z = \{z_i\}$  – множество серверов инфокоммуникационных услуг;

$G = \{g_i\}$  – множество сетевых узлов.

Для каждого сервера задано множество сетевых узлов, где он может быть установлен и затраты на его установку в этом узле:

$G_i^Z = \{g_{ij}^Z\}$  – подмножество сетевых узлов, где возможна установка сервера  $z_i$ ;

$d_{ij}^Z$  – затраты на установку сервера  $z_i$  в сетевом узле  $g_j \in G_i^Z$

Все множество сетевых узлов, где возможна установка серверов услуг разбивается на два подмножества:

$G^M$  – множество узлов, где возможна установка нескольких серверов инфокоммуникационных услуг;

$G^S$  – множество узлов, где допустимо установка, только одного сервера.

В множестве сетевых узлов задано подмножество узлов  $R \subset G$ , которые могут выполнять функции коммутации (в этих узлах установлено коммутационное оборудование).

Топология сети считается известной с известным местоположением абонентских узлов  $u_i \in U$  и узлов коммутации.

$B = \{b_{ij}\}$  – множество каналов связи в инфокоммуникационной сети, которые могут использоваться для передачи трафика, образуемого при

предоставлении услуг абонентам, где  $b_{ij}$  - канал связи, связывающий узлы сети  $g_i$  и  $g_j$ .

Заданными считаются удельные затраты на организацию пропускных способностей каналов с необходимым значением:

$d_{ij}$  – удельные расходы на обеспечение пропускной способности канала связи.

Зависимость затрат на организацию пропускной способности канала связи заданной величины имеют линейную зависимость от их пропускной способности.

Трафик передаваемый между серверами и абонентами инфокоммуникационной сети считается известным и известны все его параметры.

По своим характеристикам трафик образует несколько периодов нагрузки. Количество таких периодов заранее известно. Для каждого периода нагрузки заданы его характеристики.

Необходимо найти:

- пропускные способности каналов связи;
- маршруты передачи трафика в сети для каждого из периодов нагрузки;
- места установки серверов.

Найденная конфигурация должна обеспечивать минимальные затраты на организацию пропускных способностей каналов связи необходимой величины и на установку серверов в сетевых узлах, при условии, что задержка не превысит допустимой величины с заданной вероятностью.

### 3.2.3. Выбор метода решения задачи

Для решения этой задачи, аналогично первой задаче, в работе предлагается ее декомпозиция на две подзадачи: задача поиска мест

установки серверов и маршрутов передачи трафика согласно критерию минимума стоимости сети (веса многослойного подграфа) с использованием линейной поточной модели и задача определения пропускных способностей каналов связи для самоподобного трафика при ограничении на задержку.

### 3.2.4. Метод решения подзадачи выбора мест установки серверов и маршрутов передачи трафиков

Планируемая инфокоммуникационная система обладает наложенной структурой. Согласно общей методике синтеза с применением моделей в виде многослойного графа, необходимо выделить интересующие нас слои. В данном случае, к таким слоям, представленным наложенными сетями, можно отнести:

- слой телекоммуникационной сети, которая обеспечивает передачу трафика возникающего при предоставлении в сети инфокоммуникационных услуг;
- совокупность слоев, каждый из которых отвечает инфокоммуникационной услуге, а их количество равно количеству услуг предоставляемых в проектируемой инфокоммуникационной сети.

Далее каждый из слоев описываем графом, который соответствует данной наложенной сети. Так граф слоя телекоммуникационной сети  $\Gamma^N = (V^N, E^N)$  описывает топологию телекоммуникационной сети. Вершины данного графа соответствуют сетевым узлам:

$$g_i \Leftrightarrow v_i^N, \quad \forall g_i \in G, v_i^N \in V^N \quad (3.21)$$

Ребра  $e_{ij}^N = (v_i^N, v_j^N)$  графа  $\Gamma^N$  соответствуют каналам  $b_{ij} \in B$  связи телекоммуникационной сети:



$$b_{ij} \Leftrightarrow e_{ij}^N, \quad \forall b_{ij} \in B, e_{ij}^N \in E^N, e_{ij}^N = (v_i^N, v_j^N) \quad (3.22)$$

Совокупность графов  $\Gamma^S = \{\Gamma^s\}$  слоев инфокоммуникационной сети:

$$s_i \Leftrightarrow \Gamma^i, \quad \forall s_i \in S, \Gamma^i \in \Gamma^S, \quad (3.23)$$

содержат вершины, соответствующие абонентам и серверам инфокоммуникационных услуг, которые задействованы в предоставлении инфокоммуникационной услуги соответствующей этому слою

$$u_i \Leftrightarrow v_i^s, v_i^s \in V^s, \quad \forall u_i \in U. \quad (3.24)$$

Для каждого информационной связи, которая возникает при предоставлении инфокоммуникационной услуги в состав графов этого слоя вводятся ребра их моделирующие.

Далее синтезируется граф  $\Gamma' = (V^N, V^S, E')$  связывающий вершины слоев многослойного графа, содержит ребра, которые соединяют вершины  $V^N$  графа  $\Gamma^N$  с вершинами  $V^s$  графов  $\{\Gamma^s\}$  и описывают местоположение абонентов соответствующих инфокоммуникационных услуг в узлах телекоммуникационной сети. Кроме этого в состав графа  $\Gamma'$  входят ребра, связывающие вершины  $V^s$  графа  $\{\Gamma^s\}$ , которые соответствуют серверам инфокоммуникационных услуг с вершинами  $V^N$  графов  $\Gamma^N$ , соответствующим сетевым узлам в которых данный сервер может быть расположен.

Исходный многослойный граф  $MLG$ , который используется при решении задачи является объединением этих графов:

$$MLG = \Gamma^N \cup \left( \bigcup_{s=1}^{N_s} \Gamma^s \right), \quad N_s = |S|. \quad (3.25)$$

Результатирующая структура многослойного графа используемого при решении задачи представлена на Рис. 3..

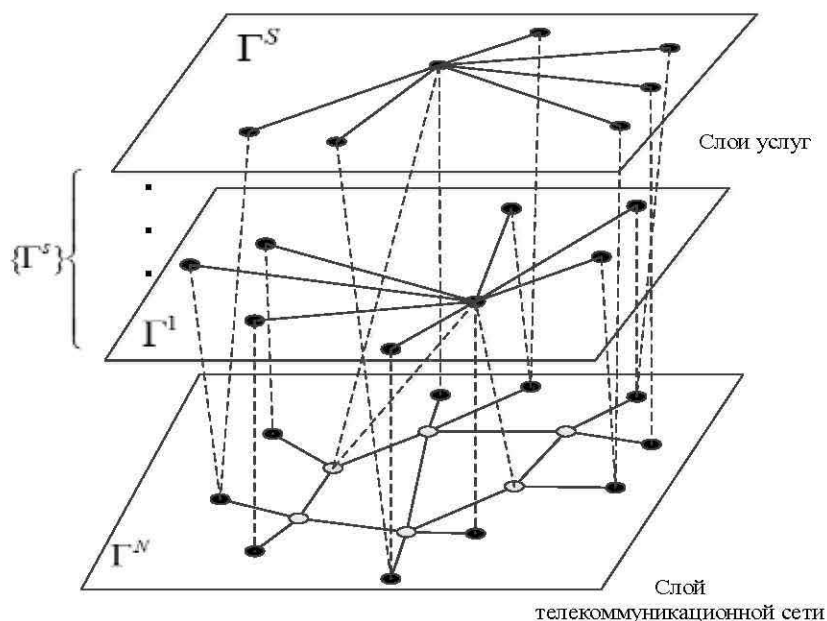


Рис. 3.1. Структура многослойного графа описывающего синтезируемую инфокоммуникационную сеть

По ребрам  $\{\Gamma^s\}$  пропускаем потоки  $\{\gamma(e_{ij}^s)\}$ , величина которого равняется интенсивности трафика между узлами отправитель – получатель. Решение поставленной задачи состоит в нахождении структуры многослойного подграфа  $MLG'$  минимального веса графа  $MLG$  и выборе значений пропускных способностей ребер графа  $\Gamma^N$ , которые удовлетворяли бы ограничениям по пропускной способности ребер, структуры многослойного графа и условиям сохранения потоков в вершинах.

Потоковая модель для этого многослойного графа описывается такими условиями-ограничениями. Условие сохранения потока в вершинах графа:

$$\sum_j x_{ji}^{sk}(q) - \sum_j x_{ij}^{sk}(q) = \begin{cases} -x_{mn}^{t,sk}, & (v_i^N, v_d^s) \in E', v_d^s \Leftrightarrow \alpha_k^s; \\ x_{mn}^{t,sk}, & (v_i^N, v_d^s) \in E', v_d^s \Leftrightarrow \beta_k^s; \\ 0, & \text{иначе}; \end{cases} ,$$

$$\forall v_i^N \in V^N, \forall s \in S, \forall \mu_k^s \in M^s, \quad (3.26)$$

где:  $x_{ij}^{sk}(q)$  – переменная-индикатор, отображающая использование ребра  $e_{ij}^N \in \Gamma^N$  для передачи  $k$ -го потока  $s$ -й услуги в направлении от  $v_i^N$  к  $v_j^N$  в период времени  $q$ ;

$x_{mn}^{t,sk}$  – переменная-индикатор, отображающая использование ребра  $e'_{smn} = (v_m^s, v_n^N)$  для передачи  $k$ -го потока  $s$ -й услуги;

$\alpha_k^s, \beta_k^s$  – узел-отправитель и узел-получатель  $k$ -го потока  $s$ -й услуги.

Условие, что запрещает передачу транзитных потоков через вершины, которые не являются маршрутизаторами в инфокоммуникационной сети:

$$\sum_s \sum_{\substack{k: \\ (v_i^N, v_d^s) \notin E', v_d^s \Leftrightarrow \alpha_k^s}} \sum_j x_{ij}^{sk}(q) + \sum_s \sum_{\substack{k: \\ (v_i^N, v_d^s) \notin E', v_d^s \Leftrightarrow \beta_k^s}} \sum_j x_{ji}^{sk}(q) = 0,$$

$$\forall v_i^N \in V^N \setminus V^R, \forall q \quad (3.27)$$

Потоки могут протекать только по существующим ребрам, которые связывают слои:

$$\sum_{k: v_m^s \in \{v_\alpha^s, v_\beta^s\}, v_\alpha^s \Leftrightarrow \alpha_k^s, v_\beta^s \Leftrightarrow \beta_k^s} x_{mn}^{t,sk} \leq K \cdot y_{mn}^s, \quad \forall (v_m^s, v_n^N) \in E', \quad (3.28)$$

где  $y_{mn}^s$  – отражает вхождение ребра  $(v_m^s, v_n^N)$  в состав результирующего подграфа  $MLG'$ .

Для передачи потоков между слоями для каждой вершины  $v_m^s$  может быть использовано только одно ребро (сервер может быть установлен только в одном узле):

$$\sum_{n: (v_m^s, v_n^N) \in E'} y_{mn}^s \leq 1, \quad \forall v_m^s \in V^s. \quad (3.29)$$

Для узлов, где допускается установка только одного сервера, вводится ограничение:

$$\sum_s \left( \sum_{m: (v_m^s, v_n^N) \in E'} y_{mn}^s \right) \leq 1, \quad \forall v_n^N \in V^A. \quad (3.30)$$

Потоки в ребрах  $e_{ij}^N \in \Gamma^N$  и их пропускные способности должны удовлетворять условию:

$$\sum_s \sum_k \lambda_k^s \cdot x_{ij}^{sk}(q) \leq c_{ij}, \quad \forall t, \forall e_{ij}^N \in E^N, \quad (3.31)$$

$$c_{ij} = c_{ji}, \quad \forall e_{ij}^N \in E^N. \quad (3.32)$$

Суммарный вес многослойного графа должен быть минимальным

$$\sum_{e_{mn}^s \in E'} d'_{sn} \cdot y_{mn}^s + \sum_{e_{ij}^N \in E^N} d_{ij} \cdot c_{ij} \rightarrow \min. \quad (3.33)$$

Эта задача сведена к задаче целочисленного программирования и решается с использованием программного пакета CPLEX v.12.

### 3.2.5. Метод выбора пропускных способностей каналов связи для самоподобного трафика при известном распределении потоков

Согласно общему методу решения задачи следующим этапом после нахождения местоположения серверов услуг и распределения потоков в сети является выбор пропускных способностей каналов связи с учетом самоподобного характера трафика в инфокоммуникационной сети.

Данная задача по своей постановке и методу решения близка рассмотренной ранее. Отличительным признаком в данном случае является необходимость учета нескольких периодов у трафика в инфокоммуникационной сети. Таким образом, исходными данными при решении данной подзадачи являются.

Дано:

$U = \{u_i\}$  – множество абоненты инфокоммуникационной сети;

$S = \{s_i\}$  – множество инфокоммуникационных услуг, предоставляемых в сети;

$Z = \{z_i\}$  – множество серверов инфокоммуникационных услуг;

$G = \{g_i\}$  – множество сетевых узлов.

Известна топология сети с известным местоположением абонентских узлов  $u_i \in U$ , узлов коммутации и серверов  $z_i \in Z$ .

$B = \{b_{ij}\}$  – множество каналов связи в инфокоммуникационной сети, которые могут использоваться для передачи трафика, образуемого при предоставлении услуг абонентам, где  $b_{ij}$  - канал связи, связывающий узлы сети  $g_i$  и  $g_j$ .

$(z_i, g_j)$  – местоположение серверов инфокоммуникационных услуг, заданные парами соответствий сервер – сетевой узел;  $z_i \Rightarrow g_j, z_i \in Z, g_j \in G_i^Z \subseteq G$ .

Заданы удельные затраты на организацию пропускных способностей каналов с необходимым значением:

$d_{ij}$  – удельные расходы на обеспечение пропускной способности канала связи.

Заданы множество потоков с их характеристиками и маршрутами передачи между узлами отправитель – получатель (между абонентами и серверами и между серверами):

$M^j = \{\mu_i^j(q)\}$  – множество трафиков возникающих в сети предоставлении услуги  $s_j \in S$  во временном интервале  $q$ ;

$(\alpha_i^j, \beta_i^j, \gamma_i^j(q), a_i^j(q), H_i^j(q))$  – набор параметров самоподобного трафика  $\mu_i \in M^j$  во временном интервале  $q$ ;

$\alpha_i^j, \beta_i^j$  – узлы получатель и отправитель для трафика  $\mu_i^j$ ;

$\gamma_i^j(q), a_i^j(q), H_i^j(q)$  – интенсивность, индекс дисперсии и значение параметра Херста трафика  $\mu_i^j(q)$  во временном интервале  $q$ ;

Необходимо определить значения пропускных способностей каналов связи  $c_{ij}$  таким образом, чтобы задержка в сети не превышала заранее определенную величину с заданной вероятностью. Критерий оптимальности минимум суммарных затрат на организацию требуемых пропускных способностей каналов связи сети.

При решении задачи воспользуемся многослойным графом, синтезированным при решении предыдущей подзадачи.

Задано:

$MLG'$  – многослойный граф, описывающий структуру синтезируемой сети. Этот граф является результирующим подграфом исходного многослойного графа найденного при решении предыдущей задачи;

$d(e_{ij}^N)$  – удельные затраты на организацию канала связи единичной пропускной способности;

$Y(q) = \{Y^l(q)\}$  - множество потоков протекающих ребрами многослойного графа  $MLG'$  во временном интервале  $q$ .

$(\gamma_i^j(q), \alpha_i^j(q), H_i^j(q))$  - параметры потока, протекающего ребрами многослойного графа  $MLG'$  во временном интервале  $q$ .

Необходимо найти:  $c_{ij}^N, \forall e_{ij}^N \in E^N$  - пропускные способности ребер графа соответствующих каналам связи синтезируемой телекоммуникационной сети.

Распределение потоков и их маршруты передачи определены при решении предыдущей задачи.

Потоки протекающие ребрами  $e_{ij}^N$  графа телекоммуникационной сети  $\Gamma^N$  являются потоками, протекающими во временном интервале  $q$  и для их моделирования применяется модель фрактального Броуновского трафика, характеризующегося набором параметров:  $\lambda_{ij}^s(q)$  - интенсивность потока, бит/с;  $t_{ij}^s(q)$  - средняя длина пакета, бит;  $\xi_{ij}^s(q)$  - коэффициент дисперсии;  $H_{ij}^s(q)$  - параметр Херста.

Обозначим как  $\gamma_{ij}^N(q)$  - поток, протекающий по ребру графа нижнего слоя. Поток  $\gamma_{ij}^N(q)$  образуется в результате объединения потоков, соответствующих потокам, протекающих по ребрам верхних слоев многослойного графа, учитывая что найденные при решении предыдущей задачи значения переменных индикаторов  $x_{ij}^{sk}(q)$  определяют маршруты протекания потоков в ребрах  $e_{ij}^N$  графа телекоммуникационной сети  $\Gamma^N$  можно записать:

$$\lambda_{ij}(q) = \sum_s \sum_k \lambda_k^s(q) \cdot x_{ij}^{sk}(q) \quad (3.34)$$

$$H_{ij}(q) = \max_{s,k} [H_k^s(q) x_{ij}^{sk}(q)] \quad (3.35)$$

$$\xi_{ij}(q) = \frac{\sum_s \sum_k \lambda_k^s(q) \cdot \xi_k^s(q) \cdot x_{ij}^{sk}(q)}{\sum_s \sum_k \lambda_k^s(q) \cdot x_{ij}^{sk}(q)} \quad (3.36)$$

Таким образом, основываясь на приведенной математической модели инфокоммуникационной системы, задачу параметрического синтеза сформулируем как оптимизационную задачу следующего вида.

Критерий оптимальности:

$$\sum_{e_{ij}^N \in E^N} d_{ij} \cdot c_{ij} \rightarrow \min. \quad (3.37)$$

Ограничения:

$$\lambda_{ij}(q) = \sum_s \sum_k \lambda_k^s(q) \cdot x_{ij}^{sk}(q) \quad (3.38)$$

$$H_{ij}(q) = \max_{s,k} [H_k^s(q) x_{ij}^{sk}(q)] \quad (3.39)$$

$$\xi_{ij}(q) = \frac{\sum_s \sum_k \lambda_k^s(q) \cdot \xi_k^s(q) \cdot x_{ij}^{sk}(q)}{\sum_s \sum_k \lambda_k^s(q) \cdot x_{ij}^{sk}(q)} \quad (3.40)$$

$$c_{ij} = c_{ji}, \quad \forall e_{ij}^N \in E^N \quad (3.41)$$

$$\lambda_{ij}^1(q) < c_{ij}^1, \quad \forall e_{ij}^1 \in E^1, \forall q, \quad (3.42)$$

Задача параметрического синтеза (3.37)-(3.42) была сведена к задаче без ограничений и решена с применением метода наискорейшего спуска, реализованный в среде MatLab.



### 3.3. Выводы по разделу 3

1. Представление структуры инфокоммуникационной сети в виде модели представленной как многослойного граф позволяет повысить эффективность решения задач синтеза и описать систему как единый целостный объект.

2. Применение модели трафика в инфокоммуникационной сети в виде модели самоподобного процесса позволяет более точно описать характеристики современного трафика.

3. В качестве модели групповых потоков в сетях целесообразно использовать модель фрактального броуновского движения.

4. Метод базирующийся на использовании моделей самоподобных процессов, при решении задач параметрического синтеза позволяет определить пропускные способности каналов связи, при которых задержка на практике наиболее близко соответствуют величине, ожидаемой при решении задачи параметрического синтеза.

## РАЗДЕЛ 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННЫХ В РАБОТЕ  
МЕТОДОВ СТРУКТУРНОГО И ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА  
ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

В данном разделе автором описана методика проведения исследования эффективности предложенных в диссертационной работе методов структурного и параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей и произведен анализ результатов экспериментальных исследований.

4.1. Общая методика проведения исследования предложенных в работе методов структурно-параметрического синтеза

Для оценки работоспособности и эффективности методов структурного и параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей, которые предложены в диссертации, необходимо провести синтез сетей различной размерности при различных исходных данных. Целью эксперимента является установление влияния исходных данных и размерности решаемой задачи на результаты и характеристики работы алгоритмов. При проведении серии экспериментов по исследованию эффективности и работоспособности предложенных в диссертации методов синтеза будут использоваться следующие типы исходных данных:

- размещения и логических привязок узлов сети;
- стоимостные характеристики строительства линии связи и организации каналов связи сети;
- характеристики и интенсивности трафика данные о параметрах информационных потоков между парами отправитель-получатель;
- количество узлов сети.

Величины и значения соответствующих параметров, используемых в качестве исходных данных при проведении экспериментов, были синтетическими наборами синтезируемые случайным образом с помощью датчика случайных чисел, статистические характеристики которого аналогичный исходным данными при реальном проектировании.

Методика проводимого эксперимента с учетом особенности решаемых задач описана в пунктах 4-го раздела, посвященных исследованию эффективности соответствующих методов.

#### 4.2. Описание структуры программного пакета используемого при проведении исследования

Методы одноэтапного и многоэтапного структурного и параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей, которые были предложены и разработаны в диссертационной работе программно были реализованы и включены в состав программного комплекса, который использовался для при проведении исследования. Структурно программный комплекс состоит из следующих частей (Рис. 4.1):

- база проектов, которая представляет собой информационное наполнение программного комплекса и содержащая исходные и промежуточные данные проектирования;
- библиотека подпрограмм в которых реализованы различные методы синтеза в том числе и предложенные в диссертационной работе;
- менеджер взаимодействия;
- средства анализа полученных вариантов конфигурации сети;
- средства визуализации результатов проектирования.

В состав комплекса включены агенты трассировки, предназначенные для мониторинга внутренних параметров методов и промежуточных вариантов конфигураций сетей на каждом из шагов методов. Эти агенты

используются для исследования эффективности, предложенных в работе методов.

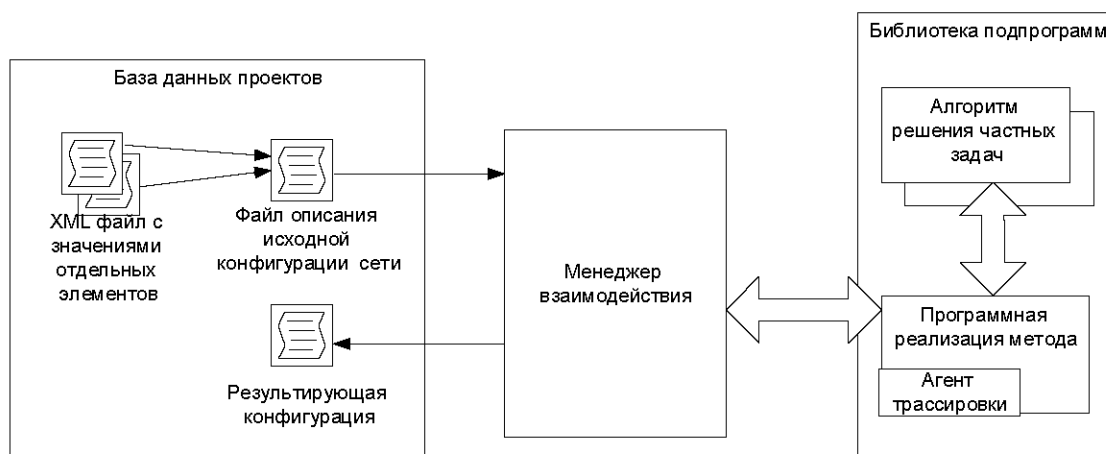


Рис. 4.1. Структура программного пакета используемого при проведении экспериментов

Центральным и основным элементом пакета является библиотека подпрограмм. В состав библиотеки подпрограмм входят программные реализации методов решения частных задач, а также, предложенных в работе методов синтеза инфокоммуникационных сетей.

При исследовании предложенных в работе методов чаще всего использовались файлы описания оптимизационных задач с последующим решением поставленных задач в специализированных пакетах математического моделирования и решения оптимизационных задач, на базе данных содержащихся в базе данных проектов.

В состав библиотеки подпрограмм программного пакета, помимо программных реализаций методов, предложенных автором, входят программные пакеты математического моделирования других разработчиков, такие как IBM ILOG CPLEX, The MathWorks MATLAB, GLPK и другие. Эти сторонние специализированные программные пакеты применяются для решения задач одноэтапного и многоэтапного структурно-параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей предварительно сведенных к классическим оптимизационным задачам, таким как: задача

булевого линейного программирования, задача линейного программирования, задачи смешанного линейного программирования и другие.

Исходные данные в базе данных проектов имеют внутреннее представление основанное на матричном и табличном представлении в виде XML файлов. При этом, с целью увеличения удобства проведения исследования предложенных в работе алгоритмов, исходные данные в базе данных проектов хранятся в следующем виде:

- все исходные данные, представленные в виде матриц, векторов, предназначенные для применения в подпрограммах синтеза, хранятся в виде отдельных файлов. В именах соответствующих файлов содержится информация о типе хранимой информации, размерности и принадлежности;
- совокупность исходных данных, которое используется для решения задачи синтеза конкретной сети, задаются отдельным XML файлом, связывающем значения параметров с отдельными файлами базы данных проектов в которых эти данные содержатся;
- результирующая конфигурация сети, получаемая за счет применения программного комплекса сохраняется в отдельной файл.

Раздельное хранение значений параметров для отдельных элементов и использование файла описания решаемой задачи позволяет, во время проведения экспериментов по исследованию эффективности и особенности функционирования разработанных и описанных в работе методов структурно-параметрического синтеза, с малыми затратами и достаточно гибко менять набор исходных данные, используемых при решении задачи. Так, например, при необходимости изменения параметров трафика в сети (матрицы нагрузки поступающей в сеть) достаточно изменить имя подключаемого файла из базы данных проектов в соответствующем поле файла описания.

Единообразное, формализованное и систематизированное представление исходных и результирующих данных обеспечивает

согласованный обмен данными между компонентами программного пакета, но такое представление неудобно анализа результатов человеком. Поэтому для обеспечения предоставления пользователю комплекса результатов проектирования в удобном для восприятия виде в состав пакета включены средства визуализации, которые производят выборку информации из базы данных проектов и формирует графический файл с результирующей структурой инфокоммуникационной сети.

Менеджер взаимодействия, входящий в состав программного комплекса, обеспечивает управление работой программного пакета. Он производит считывание файла описания решаемой задачи синтеза из базы данных проектов и основываясь на этих данных, производит вызов подпрограмм из библиотеки подпрограмм, загружает из базы данных значения параметров отдельных ее элементов и передает эти данные в соответствующие подпрограммы, обеспечивает функционирование агентов трассировки и фиксацию информации от них, после окончания работы сохраняет полученные результаты в базу данных проектов.

#### 4.3. Общая методика исследования эффективности предложенных в работе методов синтеза с применением программного пакета

В диссертационной работе проводился эксперимент, направленный на исследование эффективности предложенных в работе методов одно- и многоэтапного структурно параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей, в том числе базирующихся на использовании моделей самоподобных процессов, путем сравнения значений целевых функций (достигаемых значений критериев оптимальности) с аналогичными показателями получаемых за счет применения ранее известными методами.

С целью обеспечения адекватного сопоставления результатов синтеза инфокоммуникационных сетей предложенными в работе и ранее

известными методами, синтез сетей производился при одинаковых условиях. Для этого в начале эксперимента формировалась база исходных данных (база данных проектов), описанного выше программного пакета. Это достигалось за счет использования специально разработанной утилиты, которая формировала исходные данные для решения задач синтеза с использованием датчиков случайных величин, распределенных по заданному закону.

При проведении эксперимента по исследованию эффективности предложенных методов синтеза использовалась программная реализация этих методов на языке C++. Алгоритм работы этой программы был следующий. Исходные данные для решения задачи синтеза извлекались в виде файлов XML с описанием исходного избыточного многослойного графа или в виде матриц. Далее, на основе извлеченных данных о структуре и весах ребер многослойного графа, программа синтезировала файл описания оптимизационной задачи. Полученный таким образом файл загружался в программу решения задач смешанного линейного программирования или передавался в программный пакет MatLab в зависимости от решаемой задачи. После решения оптимизационной задачи результаты сохранялись в отдельный файл. Далее вновь запускалась разработанная автором программа, которая преобразовывала полученный вариант синтеза обратно в формат данных, обеспечивающий их хранение в базе данных проектов. Результирующая топология сети, при необходимости, могла быть отображена в графическом виде для ее анализа человеком.

#### 4.4. Исследование метода структурно-параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей с несколькими периодами нагрузки

Исследование метода структурно-параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей с несколькими периодами нагрузки будем проводить по двум направлениям:

- сопоставление предложенного метода синтеза при нескольких периодах нагрузки с однопериодным методом;

- сопоставление предложенного метода синтеза в случае использования моделей самоподобных процессов и в случае использования моделей простейшего потока.

При проведении исследований мы в начале будем использовать аналитические модели. Затем часть полученных в результате синтеза конфигураций инфокоммуникационной сети будет проверено с использованием другого метода, в качестве которого будет выступать имитационное моделирование в сочетании с натурным экспериментом.

#### 4.4.1. Сопоставление результатов синтеза для однопериодного и многопериодного подхода

Проведем сравнительный анализ метода структурно параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей учитывающий наличие нескольких периодов нагрузки с однопериодным методом, ориентированным на планирование по часу наибольшей нагрузки.

Методика проводимого эксперимента заключается в том, что при одинаковых исходных данных предложенный в работе метод сравнивается с ранее известным, в роли которого в работе использовали следующий метод:

- 1) проводился анализ поступающей многопериодной нагрузки в результате которого определяются периоды с максимальной нагрузкой (час наибольшей нагрузки) для каждого его типа;

- 2) решаем задачу однопериодным методом, где в качестве значения поступающей нагрузки используем их значения в период с максимальной нагрузкой, найденные на предыдущем шаге.

Использование такого метода гарантирует, что требования к вероятностно-временным характеристикам передачи трафика через



инфокоммуникационную сеть будут выполняться для любого из периодов нагрузки.

Вариант решения задачи, полученный с использованием предложенного в работе метода, сопоставлялся с решением, полученным описанным выше альтернативным методом. В качестве показателя, по которому производилось сопоставление, было значение целевой функции. Оба метода запускались при одинаковых наборах исходных данных. Размерность синтезируемой сети менялась от 15 узлов сети до 50, при этом:

- количество типов трафика (предоставляемых инфокоммуникационных услуг) было равно шести;

- количество периодов нагрузки – четырем;

- значения параметров для каждой инфокоммуникационной услуги задавалось случайным образом с использованием датчика случайных чисел, значение параметра Херста выбиралось в диапазоне  $[0,5, 0,95]$ .

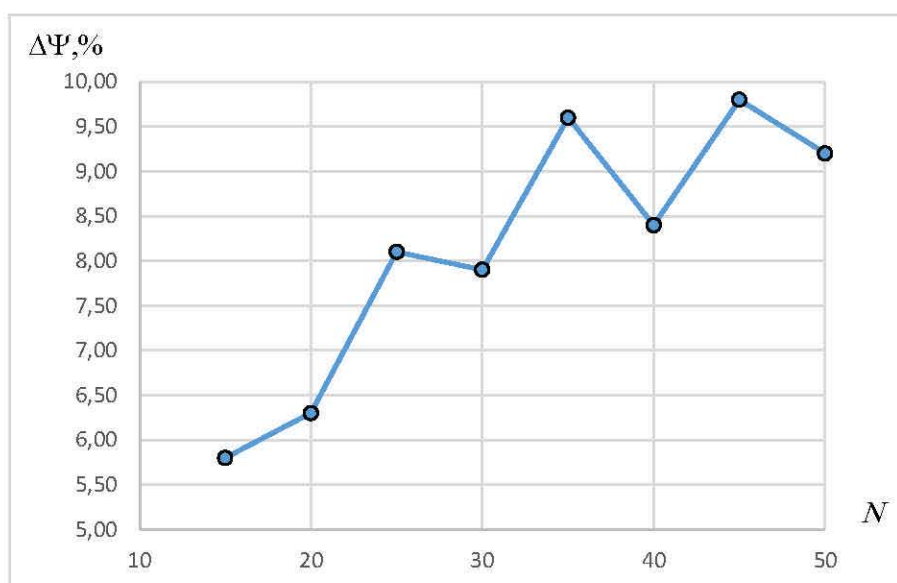


Рис. 4.2 График относительного выигрыша от применения предложенного метода в сравнении с однопериодным подходом

Сопоставление результатов эксперимента показала, что применение предложенного в работе метода структурно параметрического синтеза с несколькими периодами нагрузки позволяет получить структуру

инфокоммуникационной сети в среднем на 9 % меньшей стоимости чем методом рассчитанным на однопериодный подход при одинаковых исходных данных и требованиям к задержке.

#### 4.4.2. Сопоставление результатов многопериодного синтеза с применением моделей простейшего потока и моделей самоподобного процесса

На следующем этапе исследования предложенного метода структурно-параметрического синтеза с несколькими периодами нагрузки проведем эксперимент, целью которого является проверка целесообразности использования моделей самоподобных процессов вместо моделей простейшего потока принятого в классической теории телетрафика.

Для этого мы проведем сравнительный анализ двух методов один из которых на стадии параметрического синтеза и выбора значений пропускных способностей каналов базируется на моделях простейшего потока. Вторым методом, который используется в этом эксперименте будет предложенный в работе метод структурно-параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей, который использует модели самоподобных процессов.

В эксперименте использовалась методика предусматривающая решение задачи структурно-параметрического синтеза обоими методами при одинаковых исходных данных.

Сравнение результирующей стоимости полученной конфигурации инфокоммуникационной сети показало, что стоимость сети, синтезированная предложенным в работе методом структурно-параметрического синтеза имеет большее значение стоимости. Это объясняется тем, что при передаче в сети трафика с эффектом самоподобия пропускные способности каналов связи должны быть больше чем для

трафика описываемого моделями простейшего потока (трафик без эффекта самоподобия).

Полученные в результате решения задачи методом, базирующимся на классических моделях простейшего потока, значения пропускных способностей каналов связи, использовались при расчете среднесетевой задержки в сети с использованием расчетных выражений для самоподобного трафика. При этом расчете использовались параметры самоподобного трафика с интенсивностями равными интенсивностям потоков используемых при решении задачи структурно-параметрического синтеза методом, базирующимся на классических моделях.

Таблица 4.1.

**Результаты эксперимента по исследованию метода определения пропускных способностей каналов связи с использованием разных моделей**

Вариант набора исходных данных	$\bar{T}_{ооп}$ , мс	$\bar{T}_{п.м.}$ , мс	$\bar{T}_{с.м.}$ , мс
Вариант 1	12,3	13,5	12,7
Вариант 2	8,4	9,6	8,3
Вариант 3	5,5	5,8	5,5
Вариант 4	10,7	12,1	10,6
Вариант 5	5,8	6,4	5,9
Вариант 6	7,0	7,5	7,1

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что при использовании для решения задачи структурно-параметрического синтеза метода, базирующегося на использовании моделей простейшего потока мы получаем значения пропускных способностей каналов связи, которые не позволяют получить конфигурацию инфокоммуникационной сети удовлетворяющей требования по задержке для случая если в сети будет передаваться трафик с эффектом самоподобия. Это объясняется тем, что применение классических моделей выдает оптимистическую оценку задержки

пакетов в узлах сети и как результат занижает необходимое значение производительности узлов и пропускных способностей каналов связи.

Полученные в результате проведенного эксперимента результаты и выводы дает в некоторой степени ожидаемый результат, а именно, что увеличение пропускных способностей каналов связи с одной стороны позволяют передавать трафик с большей интенсивностью, а с другой стороны увеличивают затраты на строительство сети. Поэтому возникает интерес к исследованию конфигураций сети с одинаковыми стоимостями.

Следует обратить внимание, что применение обоих методов приводило к тому что структура (топология и размещение серверов) сети была одинаковым и одинаковыми были распределения потоков в сети. Это объясняется тем, что в обоих случаях в результате декомпозиции решаемой задачи использовался метод, который не зависит от используемой модели трафика в сети. В этом случае для уравнивания стоимостей сети весь избыток средств можно направить на увеличение пропускных способностей каналов связи. В проводимом эксперименте мы для конфигурации полученной методом базирующимся на классических моделях пропорционально увеличили пропускные способности каналов связи.

Таблица 4.2.

**Результаты эксперимента по исследованию метода определения пропускных способностей каналов связи после их пропорционального увеличения**

Вариант набора исходных данных	$\bar{T}$ , мс	$\bar{T}_{п.м.}$ , мс	$\bar{T}_{с.м.}$ , мс	Выигрыш, %
Вариант 1	12,3	12,6	11,7	7,1
Вариант 2	8,4	8,9	7,9	13,0
Вариант 3	5,5	5,8	5,2	10,5
Вариант 4	10,7	10,8	10,3	5,8
Вариант 5	5,8	6,0	5,6	7,1
Вариант 6	7,0	7,4	6,6	12,1

Полученная после увеличения пропускных способностей каналов связи конфигурация сети использовалась для расчета среднесетевой задержки с использованием как моделей простейшего потока, так и моделей самоподобных процессов.

Сравнительный анализ среднесетевых задержек показал, что увеличение пропускных способностей как и ожидалось привело к уменьшению среднесетевой задержки в случае передачи через сеть трафика без эффекта самоподобия. В тоже время, в случае передачи в сети самоподобного трафика среднесетевая задержка в конфигурации сети синтезированной с применением классических моделей с их дальнейшим пропорциональным увеличением имело на 5-13% большее значение среднесетевой задержки чем сеть синтезированная предложенным в работе методом. Что свидетельствует об эффективности предложенного в работе метода.

Результаты полученные аналитическим моделированием в работе были проверены с использованием средств имитационного моделирования.

#### 4.5. Методика проведения исследования с использованием имитационного моделирования

Исследование адекватности, предложенных в диссертационной работе моделей и базирующегося на них метода проведем с использованием следующей методики, состоящей в применении средств имитационного моделированию с последующим анализом вероятностно - временных характеристик функционирования сети и процессов протекающей в ней. Затем результаты, полученные при имитационном моделировании сопоставлялись с ожидаемыми результатами, полученными с применением аналитических моделей и расчетов, которые легли в основу предлагаемых в диссертационной работе методов.

Совокупность экспериментов на котором базировалось наше исследование содержало следующую последовательность шагов:

- с использованием фрагмента инфокоммуникационной сети проводился сбор реализаций трафиков циркулирующих в сети;
- тестирование полученных реализаций трафика на наличие свойств самоподобия;
- определение параметров реализаций трафиков с применением математической модели самоподобных процессов;
- синтез имитационной модели инфокоммуникационной сети структура и параметры элементов, которой были определены предлагаемым в диссертационной работе методом;
- проведение совокупности имитационных моделирований с последующим анализом полученных результатов и их сопоставлением с теоретически ожидаемыми, для случая применения предложенных в работе моделей и моделей теории массового обслуживания.

Структура фрагмента инфокоммуникационной сети которая использовалась в натурном эксперименте по сбору реализаций трафиков в каналах связи, с целью их дальнейшего использования в качестве внешнего воздействия при проведении имитационного моделирования, рассматривается ниже.

Имитационное моделирование производилось в среде сетевого эмулятора ns-2. При проведении данного эксперимента для описания имитационной модели использовался язык сценариев (скриптов) Tcl используется в качестве интерпретатора.

#### 4.6. Построение экспериментального фрагмента инфокоммуникационной сети

Натурный эксперимент по сбору реализаций трафика производился на базе инфокоммуникационной сети схема экспериментального фрагмента которой представлена на Рис. 4..

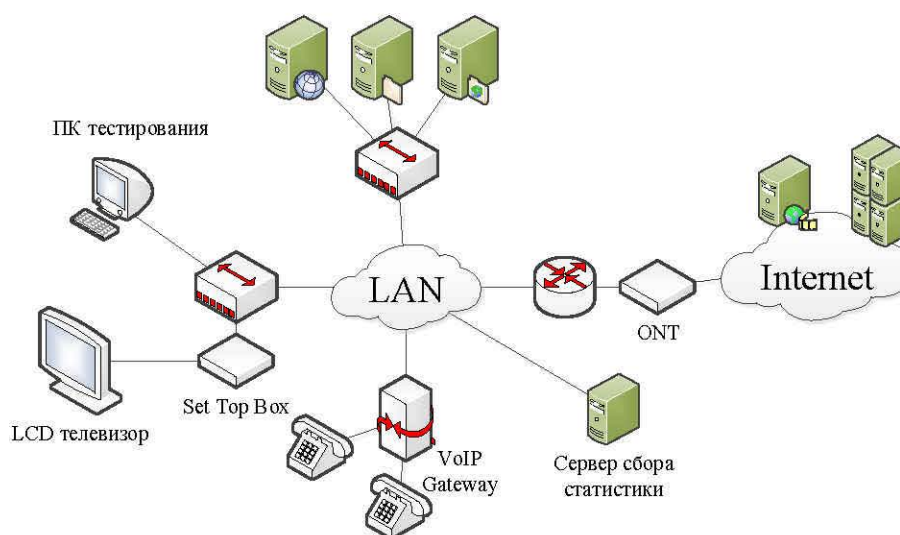


Рис. 4.3 Схема исследуемого фрагмента инфокоммуникационной сети

В состав сети входят: сервера инфокоммуникационных услуг, как локальные так расположенные в сети Internet; SetTopBox, обеспечивающий прием сигнала IPTV к которому подключен телевизор; оборудование сети передачи данных с использованием технологии Ethernet; шлюзовое оборудование между сетями ТфОП и сетью IP-телефонии; телефонные аппараты и программный агент IP-телефонии; персональные компьютеры и сервер сбора статистики. Доступ в сеть Internet осуществляется через GPON с использованием ONT.

В данном фрагменте сети производилось исследование реализаций передачи речевой информации и сеансов связи IP-телефонии, при которых сеанс телефонной связи устанавливался между традиционными телефонными аппаратами и программным агентом. При этом с помощью сервера сбора статистики с установленным программным обеспечением Warshark производился сбор реализаций информационных потоков.

При исследовании реализаций видео трафика эксперимент производился над услугой IPTV за счет приема телевизионного сигнала через IP сеть от одного из операторов города Харькова. Регистрация реализаций трафика передаваемого в сети производилось аналогично предыдущему случаю сервером статистики и пакетом Warshark.

Дополнительно к описанным выше экспериментам с мультимедийным трафиком, исследовались также реализации трафика передачи данных. Для этого производилось передача между персональным компьютером и сервером, а также фиксировался трафик возникающий при доступе к различным информационным услугам на базе web-технологий и трафик который передается в сети кафедры в течении рабочего дня. Фиксация реализаций потоков производилось посредством сервера сбора статистики.

#### 4.7. Анализ реализаций информационных потоков

При математическом описании вероятностно временных характеристик информационных потоков обычно используются такие параметры как: длина сообщения, интервал между поступлениями соседних сообщений, текущая интенсивность информационных потоков. Наличие множества параметров потока усложняет анализ его с точки зрения одномерных математических моделей самоподобных процессов. С целью обеспечения возможности исследования информационных потоков с применением методов теории самоподобных процессов необходимо преобразование их реализаций к одномерному виду, сведение множество параметров к параметру интенсивности потока, которое производится с применением процедуры агрегирования.



#### 4.7.1. Процедура агрегирования

Оценка интенсивности трафика по полученным в ходе натурального эксперимента трассировкам трафика требует приведения их к эквидистантной (с постоянным шагом  $\Delta T$ ) шкале по оси времени. Это можно осуществить с использованием процедуры агрегирования, что позволит привести исходные реализации и получить временной ряд, характеризующий интенсивности трафика во времени.

Агрегирование трафика проведем с использованием процедуры, которая имеет следующий вид.

В начале ось времени разбивается на интервалы  $\Delta T$ . Каждому интервалу ставится в соответствие отношение объема трафика (в байтах), поступившему за данный интервал к длительности этого интервала (в секундах). При этом величина  $\Delta T$  называется уровнем агрегирования.

Допустим  $\xi = \{\xi(t_1), \xi(t_2), \dots, \xi(t_n)\}$  - исходная (не эквидистантная) реализация трафика, длительностью  $n$  отсчетов. При этом  $|t_{i+1} - t_i| \neq \text{const}$ , где  $i = 1, n$ . Процедура агрегирования схематично приведена на Рис. 4..

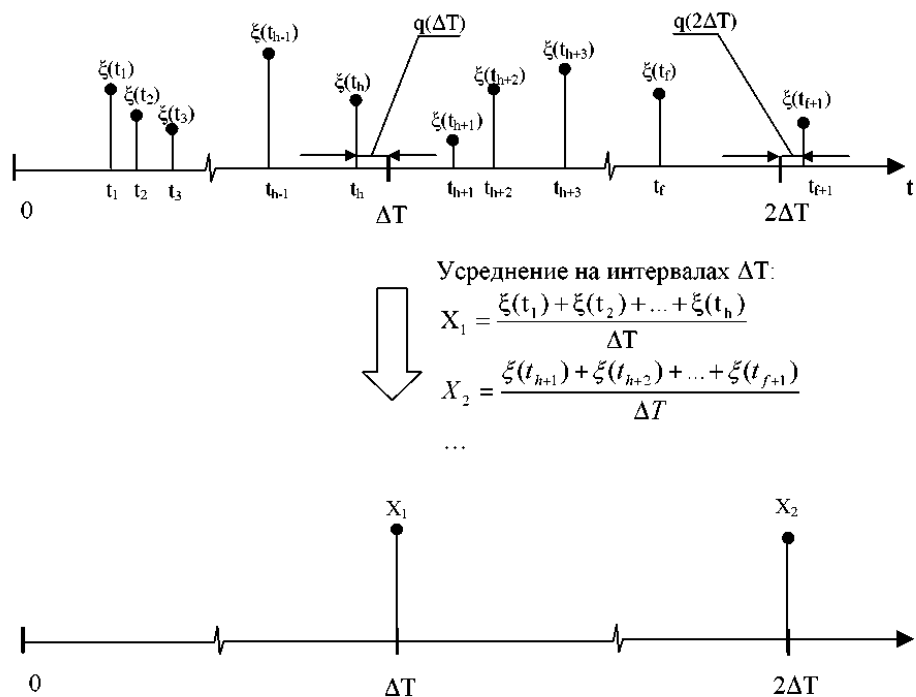


Рис. 4.4. К пояснению процедуры агрегирования реализации

В связи с тем, что отсчеты  $\Delta T, 2\Delta T, \dots, N\Delta T$  чаще всего не совпадают с отсчетами  $t_i$  исходной реализации, примем за правило (при усреднении) в качестве последнего элемента, принадлежащего некоторому интервалу  $\Delta T$  брать ближайший отсчет  $\xi$ . Иными словами, к интервалу  $\Delta T-2\Delta T$  отнесем отсчеты  $\xi(t_{h+1}), \xi(t_{h+2}), \dots, \xi(t_{h+1})$ . Следует отметить, что чем меньше значения ошибок  $|q(\Delta T)|, |q(2\Delta T)|, |q(3\Delta T)|, \dots, |q(N\Delta T)|$ , тем меньше искажений вносится на данном этапе.

Применение описанной выше процедуры агрегирования позволяет получить агрегированную эквидистантную реализацию трафика  $\xi^{(\Delta T)} = \{ \xi(\Delta T), \xi(2\Delta T), \dots, \xi(N-\Delta T) \}$ , содержащую  $N$  элементов. Каждому значению полученного временного ряда соответствует усредненная интенсивность трафика (байт/сек) на соответствующем временном интервале  $\Delta T$ .

При исследовании реализаций мультисервисного трафика полученных в ходе натурального эксперимента производилось агрегирование с уровнями агрегирования  $\Delta T=0,1$  с,  $\Delta T=1$  с и  $\Delta T=5$  с. Аналогично для обозначения полученных при этом временных рядов использовалось обозначение xxx-0,1, xxx-1 и xxx-5 соответственно, где xxx – условное название типа передаваемого потока.

#### 4.7.2. Исследование полученных реализаций и определение параметров информационных потоков

Перед проведение экспериментов с использованием средств имитационного моделирования необходимо определить параметры полученных в ходе натурального эксперимента реализаций трафика и агрегированных временных рядов. В рамках данной диссертационной работе используемые математические модели трафика представлены самоподобными процессами и характеризуются такими параметрами как: интенсивность трафика, средняя длина пакета, значение параметра Хэрста.

Интенсивность трафика и средняя длина пакета оценивалась с использованием методов математической статистики для дискретных рядов как математическое ожидание. Результаты анализа реализаций для различных типов трафика приведены в табл.4.1, при этом использовались следующие условные названия передаваемых потоков: Date-xx – информационные потоки данных передаваемые в локальной сети кафедры, IPTV-xx – трафик при доступе к услугам IPTV, VoIP-xx – передача речи в течении сеанса связи IP-телефонии. Символами «xx» обозначен уровень агрегирования. Параметры информационных потоков для других участков сети (и их реализации), которые не вошли в таблицу использовались далее при исследовании адекватности предложенных в работе методов.

В таблице приведены результаты измерений для математическое ожидания длины пакета исходного временного ряда, математического ожидания интенсивности передаваемого потока  $f$  для агрегированных временных рядов и измерения показателя Хэрста 5-ю методами. Оценка параметра Хэрста и точность его оценки проводилось с помощью программного пакета Selfis v.0.1b, в табл.4.2 значение параметра  $H$  и точность оценки в процентах приведены через дробь.

Таблица 4.2.

Результаты анализа информационных потоков, передаваемые по каналам связи экспериментального фрагмента сети

Реализация	$f$ , кбит/с	$\bar{n}$ , байт	Оценка параметра Хэрста				
			R/S	Absolute Moments	Whittle Estimator	Periodogram	Aggregate Variance
Date-0,1	3 107	653	0,772/97	0,953 / 98	0,89 / 95	0,864	0,851 / 98
IPTV-0,1	6036,3	503	0,756 99	0,862 / 96	0,76 / 95	0,762	0,762 / 97
VoIP-1	23,6	174	0,759/ 98	0,842 / 97	0,89 / 95	0,784	0,836 / 96

Из анализа результатов оценок приведенных в табл. 4.2 следует отметить, что для всех приведенных реализаций трафика значение

параметра Хэрста  $H > 0,5$ , что свидетельствует о наличие у этих трафиков свойств самоподобных процессов.

На основе полученных данных можно сделать вывод:

1. Полученным временным рядам свойственно наличие самоподобия.
2. Трафик, возникающий в инфокоммуникационной сети при предоставлении услуг, обладают эффектом самоподобия.

Полученные в ходе натурального эксперимента реализации трафика могут быть использованы в ходе исследования адекватности, используемых в диссертационной работе математических моделей и достоверности результатов расчета параметров инфокоммуникационной сети, предложенными в работе методами, в качестве входных воздействий на имитационную модель.

#### 4.8. Исследование модели трафика в наложенной инфокоммуникационной сети

Исследование модели трафика в наложенной инфокоммуникационной сети проведем с использованием имитационного моделирования на компьютере. Структура имитационной модели представлена на рис 4.5.

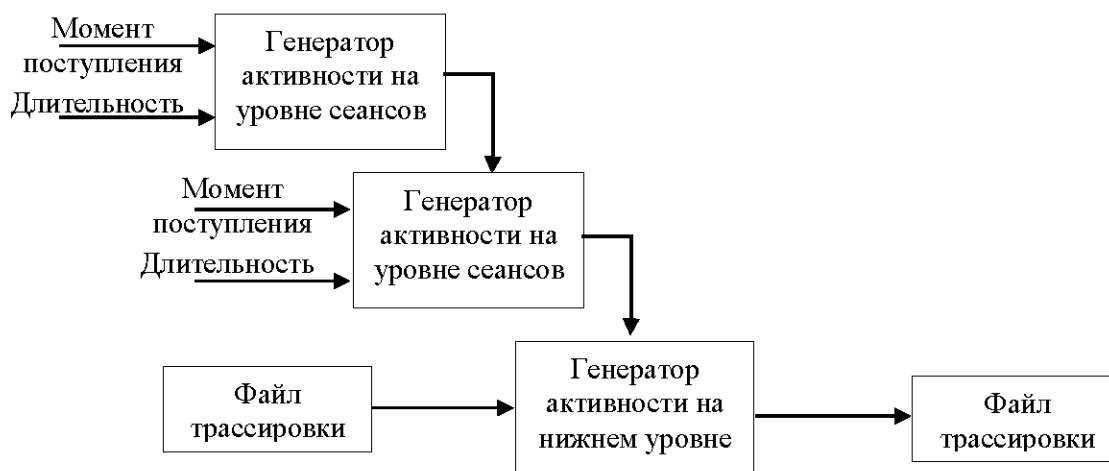


Рис. 4.5. Структурная схема имитационной модели

В состав имитационной модели входят следующие элементы:

- генераторы активности, функционирующие на основе аналитических моделей случайных процессов;
- генератор трафика базирующийся на файле данных трассировки реальной сети.

Генераторы активности на базе аналитических моделей используют в своем составе датчики случайных чисел, которые генерируют случайные числа, распределенные по экспоненциальному закону и распределение Паретто.

Использование экспоненциального закона распределения позволяет моделировать пуассоновский процесс, которые в данном случае используется для описание процесса поступления заявок на установку сеансов связи. Для описания длительности сеанса связи использовались экспоненциальное распределение и распределение Паррето.

Для описания активности источника трафика в пределах сеанса связи использовалось распределение Паретто.

Для моделирования последовательности поступающих пакетов на нижнем уровне использовались данные полученные в результате натурального эксперимента на реальном фрагменте сети, описанном ранее. При этом мы использовали информацию об длительности пакетов и об временных интервалах между пакетами поступающими от одного и того же источника узла сети.

В результате эксперимента анализировался трафик возникающий на нижнем уровне. Далее определяли значения его интенсивности и дисперсии, которые сравнивались с результатами расчета с применением модели трафика в наложенной сети предложенной в данной диссертационной работе. Результаты эксперимента сведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3.

**Результаты эксперимента по исследованию модели трафика в  
наложенной инфокоммуникационной сети**

Набор исходных данных	Используемое распределение длительности	Результаты расчета		Имитационно моделирование	
		$\lambda$	$\sigma$	$\lambda$	$\sigma$
Вариант 1	Экспоненциальное	3 107	5 678	3 125	5 786
Вариант 2	Паретто	6 783	12 386	6 694	12 408
Вариант 3	Паретто	48 276	76 594	48 543	73 274
Вариант 4	Экспоненциальное	5 345	7 384	5 278	7 927

Из анализа данных приведенных в таблице можно сделать вывод, что результаты, полученные разными способами, сходятся, что подтверждает адекватность предложенной модели трафика в наложенных сетях.

4.9. Анализ результатов структурно-параметрического синтеза инфокоммуникационной сети с применением средств имитационного моделирования

Для проведения исследования предлагаемого в диссертационной работе метода параметрического синтеза инфокоммуникационной сети с несколькими периодами нагрузки предлагается следующая методика, которая состоит в том, что с применением средств имитационного моделированию будет произведен анализ вероятностно - временных характеристик функционирования сети и процессов протекающей в ней. В дальнейшем полученные результаты будут сопоставлены с ожидаемыми результатами, полученными с применением аналитических моделей и расчетов, которые легли в основу предлагаемого в диссертационной работе метода.

Имитационное моделирование производилось в среде сетевого эмулятора ns-2. При проведении данного эксперимента для описания

имитационной модели использовался язык сценариев (скриптов) Otcl используется в качестве интерпретатора.

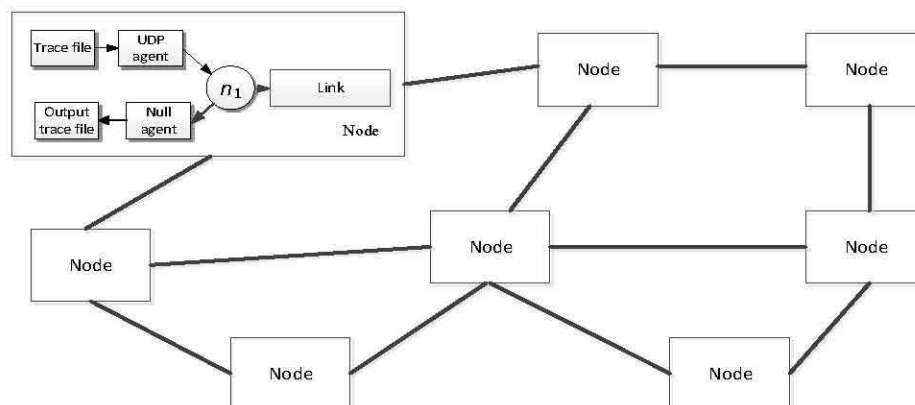


Рис. 4.6. Схема имитационной модели, используемой в эксперименте

Входным воздействием на имитационную модель являются реализации потоков, полученные в результате измерений в фрагменте мультисервисной сети. Определим параметры полученных реализаций и агрегированных временных рядов. Согласно используемой в диссертационной работе математической модели, информационные потоки в сети характеризуются следующими параметрами: средняя интенсивность передаваемого трафика, средняя длина пакета, значение параметра Хэрста.

Для оценки величины средней интенсивности трафика и средней длины пакетов использовались классические выражения математической статистики для дискретных рядов.

Оценка параметра Хэрста в работе производилась 5-ю методами с использованием программного пакета Selfis v.0.1b, который позволял кроме значения параметра Хэрста определить и точность его оценки. При проведении эксперимента в дальнейшем использовалось то значение параметра Хэрста, которое было определено с наибольшей точностью.

Из анализа полученных данных было установлено, что для исследуемых реализаций информационных потоков характерно наличие эффекта самоподобия, что подтверждается тем, что для большинства реализаций информационных потоков значение параметра Хэрста  $H > 0,5$ .

В процессе проведения эксперимента система изучается в двух конфигурациях:

- в первой конфигурации структурно-параметрический синтез сети осуществляется с применением метода базирующегося на модели простейшего потока;
- во второй конфигурации маршруты потоков определялись с использованием предлагаемого в работе метода с использованием моделей самоподобных процессов.

При проведении имитационного моделирования трафик поступающий в на имитационную модель имел четыре периода нагрузки с характеристиками, которые использовались в процессе расчета параметров сети. В процессе эксперимента фиксировались реализации информационных потоков, передаваемых по сети, с последующим их анализом на величину среднесетевой задержки в сети.

Эксперимент проводился для различных наборов, поступающих в сеть потоков и формирующие трафик с несколькими периодами нагрузки. Реализации потоков на входе имитационной модели базировались на результатах измерения потоков в реальном сегменте мультисервисной сети. Для каждого варианта поступающего в сеть потока, производилось оценка значений его параметров в рамках пуассоновской (интенсивность потока и средняя длина пакета) и самоподобной модели (интенсивность потока, средняя длина пакета и значение параметра Херста). В дальнейшем с использованием полученных значений параметров потоков решалась задача структурно-параметрического синтеза инфокоммуникационной сети обоими методами.

Результаты эксперимента представлены в таблице 4.4, где  $H$  - значение параметра Херста для потоков поступающих в сеть;  $\bar{T}$  - среднесетевая задержка пакета в сети, соответствующая значению задаваемому в качестве ограничения при решении задачи,  $\bar{T}_{п.м.}$ ,  $\bar{T}_{с.м.}$  - экспериментально полученные значения задержки для конфигураций сети,



рассчитанных с использованием пуассоновской модели и с использованием модели самоподобных процессов.

Таблица 4.4.

**Результаты эксперимента по исследованию метода определения пропускных способностей каналов связи**

Вариант набора исходных данных	$\bar{T}$ , мс	$\bar{T}_{п.м.}$ , мс	$\bar{T}_{с.м.}$ , мс	Выигрыш, %
Вариант 1	12,3	14,1	12,4	13,5
Вариант 2	8,4	9,8	8,4	16,3
Вариант 3	5,5	6,3	5,8	9,5
Вариант 4	10,7	12,5	10,7	16,7
Вариант 5	5,8	6,4	5,8	10,3
Вариант 6	7	8,4	7,2	16,7

Анализ результатов эксперимента (табл. 4.4) позволяет сделать следующие выводы:

- использование в качестве модели трафика в сети модели самоподобного процесса позволяет более точно определить параметры трафика и обеспечить, такое распределение пропускных способностей каналов связи при котором задержка на практике наиболее близко соответствуют величине, ожидаемой при решении задачи параметрического синтеза;

- в результате эксперимента было подтверждено, что применение методов, базирующихся на пуассоновской модели потоков дает заниженные требования к ресурсам сети, что приводит к конфигурациям, имеющим более высокие значения задержки и соответственно обладающими более худшими параметрами качества обслуживания;

- предложенный в работе метод определения пропускных способностей каналов связи позволяет найти более эффективные их значения, чем классический подход, за счет учета наличия в передаваемых потоках эффекта самоподобия.

Следующим этапом исследования является анализ эффективности метода параметрического синтеза инфокоммуникационной сети с групповой адресацией. Для этого мы использовали подход аналогичный рассмотренному выше. В имитационной модели сети параметры которой были рассчитаны двумя способами: с использованием моделей простейшего потока и моделей самоподобного трафика. В течении эксперимента фиксировались реализации информационных потоков, передаваемых по сети, с последующим их анализом на величину среднесетевой задержки в сети.

Реализации потоков, поступающий в сети основывались на полученных данных в файлах трассировки реального сегмента мультисервисной сети. Источник трафика задавался, узлы- получатели трафика с групповой адресацией выбирались случайно. Маршруты передачи и параметры каналов связи рассчитывались предложенным в работе методом.

Результаты эксперимента представлены в таблице 4.5 (в таблице используются обозначения аналогичные табл.4.4).

Таблица 4.5.

**Результаты эксперимента по исследованию метода определения пропускных способностей каналов связи**

Вариант набора исходных данных	$\bar{T}$ , мс	$\bar{T}_{п.м.}$ , мс	$\bar{T}_{с.м.}$ , мс	Выигрыш, %
Вариант 1	7,6	8,1	7,7	5,3
Вариант 2	8,4	8,8	8,3	6,0
Вариант 3	12,1	13,2	12,3	7,3
Вариант 4	17,1	18,6	16,9	10,3
Вариант 5	12,5	13,5	12,4	9,4
Вариант 6	9,3	10,1	9,4	7,1

Анализ результатов эксперимента (табл. 4.5) позволяет сделать следующие выводы:

- выбор математической модели трафика с групповой адресацией в инфокоммуникационной сети в виде фрактального броуновского движения является корректным;

- аналогично предыдущему эксперименту использование моделей трафика представленного в виде фрактального броуновского движения позволяет более эффективно распределить пропускные способности каналов связи и как результат уменьшить задержку в сети.

#### 4.10. Выводы по четвертому разделу

1. При исследовании предложенных в работе методов использовался разработанный в работе программный комплекс. В качестве составляющих программного комплекса должны быть: библиотека подпрограмм, содержащая инструментальных средства решения частных задач синтеза инфокоммуникационных сетей; база данных проектов, являющаяся информационным наполнение комплекса; менеджер взаимодействия; утилита визуализации результатов синтеза сетей.

2. Исследование предложенного метода необходимо проводить в условиях, приближенных к реальным, например, с использованием данных взятые с реальных проектируемых объектов. В тоже время, исследование эффективности удобнее производить с использованием синтетических данных, которые по своим характеристикам близки к реальном объектам. С той целью в работе использовалась утилита, которая синтезировала и наполняла базу данных проектов исходными данными по своим статистическим характеристикам аналогичным реальным.

3. Проведенный в работе анализ характеристик трафика передаваемого в инфокоммуникационной сети показал, что этому трафику свойственно наличие эффекта самоподобия.

4. По результатам сравнительного анализа метода параметрического синтеза инфокоммуникационной сети с multicast трафиком установлено, что

инфокоммуникационная сеть синтезированная предложенным в работе методом позволяет уменьшить задержку в сети в среднем на 7% при передаче мультисервисного multicast трафика. Результаты проведенного имитационного моделирования подтвердили результаты аналитического моделирования, свидетельствует об адекватности моделей, которые использовались.

5. Сопоставление результатов имитационного моделирования двух конфигураций сети, структурно-параметрический синтез которой производились с применением предлагаемого в работе метода и метода базирующегося на использовании моделей простейшего потока показало, что предлагаемый метод позволяет более эффективно решить задачу, что приводит к уменьшению среднего времени задержки пакетов в сети при поступлении на вход сети потоков с эффектом самоподобия.

## ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена актуальная научно-прикладная задача разработки новых и совершенствования существующих методов структурного и параметрического синтеза инфокоммуникационных наложенных сетей с использованием моделей многослойных графов и представление потоков в сети как самоподобных процессов с целью использования их в ходе проектирования. При этом получены следующие научные и прикладные результаты.

1. Проведен анализ принципов построения современных информационно-коммуникационных сетей и установлено, что решение задач оптимального синтеза современных мультисервисных сотовых сетей связи нуждается в разработке корректных математических моделей. Обращается внимание, что в мультисервисных сетях трафик имеет свойства самоподобности, что необходимо учитывать в ходе проектирования. Также необходимо учитывать, что характеристики трафика во времени изменяются и образуют несколько периодов нагрузки, при этом максимумы нагрузки для разных типов трафика чаще всего не сбегаются во времени. В работе сформулировано и решено несколько задач параметрического синтеза сетей LTE EPC. Решения задач сформулированы в виде методов, которые реализуются при наличии выходных данных на ПЕОМ.

2. Результаты исследования методов, основанных на использовании многослойного графа, свидетельствуют, что применение многослойного графа позволяет описать телекоммуникационную сеть, которая содержит наложенные сети, как единый целостный объект и получить в результате синтеза, более эффективные структуры системы по техническому и экономическим параметрам.

3. Для разработки методики анализа и синтеза мультисервисных сетей как математические модели трафика на разных уровнях и участках

мультисервисной наложенной инфокоммуникационной сети использованы модели самоподобных процессов. Указанные модели позволяют учитывать такие свойства, характерные потокам в мультисервисных сетях, как: долговременную зависимость, высокую пачечность, наличие распределения с тяжелыми хвостами для межпакетных интервалов и продолжительности занятий обслуживающих устройств, медленно затухающую дисперсию выборочного среднего.

4. Предложенная в работе модель базируется на модели в виде многослойного графа и самоподобных потоках, позволяет учитывать разный тип передаваемых единиц данных на различных уровнях наложенных сетей. Это позволяет повысить эффективность и точность методов анализа и синтеза наложенных инфокоммуникационных сетей. Результаты проведенного имитационного моделирования подтвердили результаты аналитического моделирования, свидетельствует об адекватности предложенной модели трафика.

5. Усовершенствован метод параметрического синтеза инфокоммуникационной сети с multicast трафиком, за счет использования для описания трафика модели самоподобных процессов. Сравнительный анализ выявил, что инфокоммуникационная сеть синтезированная предложенным в работе методом позволяет уменьшить задержку в сети в среднем на 7% в процессе передачи мультисервисного multicast трафика за счет корректного определения пропускных способностей каналов связи.

6. Усовершенствован метод баготоперидного параметрического синтеза инфокоммуникационной сети за счет использования моделей потоков как самоподобных процессов. По результатам сравнительного анализа установлено, что многопериодную синтез сравнению с однопериодный, позволяет получить вариант конфигурации инфокоммуникационной сети в среднем на 9% меньшей стоимости при одинаковых исходных данных и ограничениях на задержку в сети. Также использование предложенного метода позволило уменьшить среднее время

задержки по сравнению с методами, основанные на пуассоновских процессах. Результаты проведенного имитационного моделирования подтвердили результаты аналитического моделирования, свидетельствует об адекватности моделей, которые использовались.

7. Разработаны и модернизированы методики и программная реализация рекомендуется для использования в проектных организациях, на этапах проектирования инфокоммуникационных сетей, вновь сооружаемых или реконструируемых с количеством узлов до нескольких десятков, при наличии в информационных потоках, передаваемых эффекта самоподобия.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Невзорова Е.С. Иерархическо-координационный метод многоадресной маршрутизации в телекоммуникационной сети / Е.С. Невзорова, К.М. Арус, М.Т.Р. Салах // Радиотехника. – 2015. – Вып. 183. – С. 42 - 52.
2. Агеев Д.В. Параметрический синтез наложенных сетей с самоподобным трафиком / Д.В. Агеев, Моат Талат // Радиотехника. – 2015. – Вып. 184. – С. 119 - 126.
3. Nameer Qasim. Modeling of LTE EPS with Self-Similar Traffic for Network Performance Analysis / Q. Nameer, A. Al-Anssari, M.T.R Salah // Системи обробки інформації. – 2015. – № 12 (137). – С. 140 - 144.
4. Агеев Д.В. Структура и параметрический синтез инфокоммуникационной сети в условиях самоподобного трафика с несколькими периодами нагрузки / Д.В. Агеев, М.Т. Салах // Радиотехника. – 2016. – №187. – С. 5 - 13.
5. Мухи-Алдин Х.М. Комплексный метод повышения доступности сервисов в программно-конфигурируемых сетях, основанный на динамической репликации [Электронный ресурс] / Х.М. Мухи-Алдин, Е.Б. Ткачова, М.Т. Салах // Проблеми телекомунікацій. – 2016. – № 2 (19). – С. 81 - 93. – Режим доступа: [http://pt.journal.kh.ua/2016/2/1/162\\_tkachova\\_rep.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2016/2/1/162_tkachova_rep.pdf).
6. Ageyev D.V. Parametric synthesis of overlay networks with self-similar traffic / D.V. Ageyev, M.T. Salah // Telecommunications and Radio Engineering. – 2016. – No 75(14). – P.1231-12141.
7. Моат Талат. Метод многоэтапного синтеза инфокоммуникационных сетей / Талат Моат, Ф. Вехбе // 5-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2014. Сборник научных трудов: материалы форума в 4-х томах. Том II.



Международная научно-практическая конференция «Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технологии» (PIC S&T-2014). – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2014. – С. 45 - 46.

8. Агеев Д.В. Синтез наложенных телекоммуникационных сетей // Д.В. Агеев, Талат Моат // Съома Міжнародна науково-технічна конференція студентів та аспірантів «Перспективи розвитку інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем». – Київ : НТУУ КПИ, 2015. – С.116 -118.

9. Агеев Д.В . Модели и методы параметрического синтеза наложенных сетей с самоподобным трафиком/ Д.В. Агеев, М.Т.Р Салах // Шоста міжнародна науково- практична конференція «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє». – Одеса:ОНАЗ, 2016. – С.48 - 56.

10. Агеев Д.В. Параметрический синтез наложенных сетей с самоподобным трафиком / Д.В. Агеев, М.Т.Р Салах // Фізико-технологічні проблеми передавання обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції. – Чернівці: ЧНУ, 2016. – С.193 - 194.

11. Кучерявый А.Е. Сети связи следующего поколения / А.Е. Кучерявый, А.Л. Цуприков. – М.: ФГУП ЦНИИС, 2006. – 278 с.

12. Державний комітет зв'язку та інформатизації України. Концепція конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україні. – Київ, 2003.

13. Почерняев В.М. Від розробки звичайного проекту до реалізації системного проекту в галузі зв'язку / В.М. Почерняев, В.К. Укк // Зв'язок. – 2010. – № 4. – С. 71–73.

14. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями / Клейнрок Л. – М.: Мир, 1979. – 600 с.

15. Deo N. The shortest generalized Hamiltonian tree / N. Deo, S.L. Hakimi // Proceedings of the 6th Annual Allerton Conference. — 1968. — P. 879—898.

16. Peterson C. Parallel distributed approaches to combinatorial

optimization studies on traveling salesman problem / C. Peterson // *Neural Computation*. — 1990. — № 2. — P. 261—269.

17. Durbin R. An Analogue Approach to the salesman problem using an elastic net method / R. Durbin, G. Willshaw // *Nature*. — 1987. — № 326. — P. 689–691.

18. I.Chlamtac Lightpath Communications: An Approach to High Bandwidth Optical WAN's / I.Chlamtac, A.Ganz,G.Karmi / *IEEE Transactions on Communications*. - 1992. - Vol.40, N.7. – P. 1171–1182.

19. M. Saad On the Routing and Wavelength Assignment in Multifiber WDM Networks / M. Saad, Z-Q. Luo / *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* . – 2004. - Vol. 22, N. 9. – P. 1708–1717.

20. Ramaswami R. Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Networks / *IEEE/ACM Trans. Networking*. – 1995. – Vol. 3, Issue: 5. – P. 489–500.

21. Ali M. Routing algorithms for all-optical networks with power consideration : The unicast case / M. Ali, B.Ramamurthy, J.S.Deogun // *Proc of the 8th IEEE ICCCN'99, Boston-Natick MA*. – 1999. – P. 335–340.

22. Лебедев А.Т. Задача синтеза потоковой структуры цифровой транспортной сети связи / А.Т. Лебедев, Б.И. Соловьев // *Информация и космос*. – 2004. – № 4. – С. 5–7.

23. Gerstel O. Optical layer survivability: a services perspective / O. Gerstel, R. Ramaswami // *IEEE Communications magazine*. – 2000. – Vol. 38, № 3. – P. 104–113.

24. Sahasrabudde L. Fault Management in IP-Over-WDM Networks: WDM Protection Versus IP Restoration / L. Sahasrabudde, R. Ramaswami, B. Mukherjee // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. – 2002. – Vol. 20, Issue 1. – P. 21–33.

25. Haider M. Designing of multichannel optical communication systems topologies criteria optimization / M. Haider, M. Mazurek, P. Dymora // *Informatica*. – 2003. – Vol. 1. – P. 277–284.

26. Хайдер М. Эффективный метод проектирования и реконфигурации вычислительной системы с многоканальными связями // Проблемы програмування. – 2006. – № 2–3. – P. 701–707.

27. Knippel A. The Multi-Layered Network Design Problem / A. Knippel, B. Lardeux // European Journal of Operational Research. – 2007. – Vol. 138, Issue 1. – P. 87–99.

28. Guolong Zhu Joint network design in multilayer networks / Guolong Zhu, Qingji Zeng, Tong Ye, Junjie Yang // Proceedings of SPIE. – 2003. – Vol. 5282. – P. 460–469.

29. Dahl G. Routing through Virtual Paths in Layered Telecommunication Networks / A. Martin, M. Stoer // Operations Research. – 1999. – № 47. – P. 693 – 702.

30. Belotti P. MPLS over Transport Network: Two Layers Approach to Network Design with Statistical Multiplexing / P. Belotti, A. Capone, G. Carello, F. Malucelli, F. Senaldi, A. Totaro // Conference on Next Generation Internet Design and Engineering (NGI 2006). – Valencia, 2006. – P. 308–318.

31. De Maesschalck S. Multi-layer traffic grooming in networks with an IP/MPLS layer on top of a meshed optical layer / S. De Maesschalck, M. Pickavet // Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '03. – Washington: IEEE, 2003. – P. 2750–2754.

32. Gouveia L. MPLS over WDM Network Design with Packet Level QoS Constraints based on ILP Models / L. Gouveia, P. Patricio, A.F. de Sousa, R. Valadas // IEEE INFOCOM. – 2003. – Vol. 1. – P. 576–586.

33. Chen S. The multicast packing problem / S. Chen, O. Gunluk, B. Yener // IEEE/ACM Trans. on Networking. – 2000. – Vol. 8, Issue 3. – P. 311–318.

34. Charikar M. Resource optimization in QoS multicast routing of real-time multimedia / M. Charikar, J. Naor, B. Schieber // IEEE INFOCOM. – 2000. – Vol. 12, Issue 2. – P. 1518–1527.

35. Агеев Д.В. Проектирование современных телекоммуникационных систем с использованием многоуровневых графов / Д.В. Агеев // Восточно-

Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 4. – С. 75–77.

36. Агеев Д.В. Моделирование современных телекоммуникационных систем многослойными графами [Электронный ресурс] / Д.В. Агеев // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 1(1) – Режим доступа: [http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101\\_ageyev\\_simulation.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101_ageyev_simulation.pdf).

37. Агеев Д.В. Методика описания структуры современных телекоммуникационных систем с использованием многослойных графов / Д.В. Агеев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 6. – С. 56–59.

38. Leland W.E. On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version) / W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, D.V. Wilson // IEEE/ACM Trans, on Networking. – 1994. – Vol. 2, Issue 1. – P. 1–15.

39. Paxson V. Wide-Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling / V. Paxson, S. Floyd // Proc. ACM Sigcomm, London, UK. — 1994. — С. 257—268.

40. Петров В.В., Богатырев Е.А. Статистический анализ сетевого трафика // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. Десятой Междунар. научно-техн. конференции студентов и аспирантов. Том 1. – М: Издательство МЭИ, 2004.

41. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Мандельброт Б. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.

42. Ryu B. Point process models for self-similar network traffic, with applications / B. Ryu, S. Lowen // Stochastic Models. – 1998. – № 14(3). – P. 735–761.

43. Симонина О.А. Характеристики трафика в сетях IP / О.А. Симонина, Г.Г. Яновский // Труды учебных заведений связи. – 2004. – № 177. – С. 8–14.

44. Downey A. Lognormal and Pareto distributions in the Internet / A. Downey // Computer Communications. – 2005. – Vol. 28, No 7. – P. 790–801.

45. Dang T.D. Fractal Analysis and Modeling of VoIP Traffic / T.D. Dang, B. Sonkoly, S. Molnar // Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium. NETWORKS 2004, 11th International. – 2004. – P. 217–222.

46. Зарубин А.А. Исследование контакт-центров в NGN: автореф. дисс. на соискание научной степени канд. техн. наук: спец. 05.12.13 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» / А.А. Зарубин. – СПб., 2004. – 19 с.

47. Taqqu M.S. Proof of a Fundamental Result in Self-Similar Traffic Modeling / M.S. Taqqu, W. Willinger, R. Sherman // SIGCOMM Comput. Commun. Rev. – 1997. – Vol. 27, Issue 2. – P. 5–23.

48. Some New Findings on the Self-Similarity Property in Communications Networks and on Statistical End-to-End Delay Guarantee: Technical Report [JNG05-01] / Department of Computer Science, Hong Kong Baptist University; manager Joseph Kee-Yin Ng; contractors: Shibin Song, Bi Hai Tang. – Hong Kong, 2001. – 14 p.

49. Цыбаков Б.С. Модель телетрафика на основе самоподобного случайного процесса // Радиотехника. – 1999. – № 5. – С. 24–31.

50. Tsybakov B. On self-similar traffic in ATM queues: definition, overflow probability bound, and cell delay distribution / B. Tsybakov, N.D. Georganas // IEEE/ACM Trans. on Networking. – 1997. – Vol. 5, No 3. – P. 397–408.

51. Norros I. A Storage Model with Self-Similar Input / I. Norros // Queueing Systems. — 1994. — Vol. 16, No 3-4. — P. 387—396.

52. Norros I. On the use of fractional Brownian motion in the theory of connectionless networks / I. Norros // Selected Areas in Communications, IEEE Journal. — 1995. — Vol. 13, Issue 6. — P. 953—962.

53. Patel A. Statistical Multiplexing of Self-Similar Traffic: Theoretical and Simulation Results [Online] / A. Patel, C. Williamson // University of Saskatchewan, Department of Computer Science, 1997. – Access by:

<http://www.cs.usask.ca/faculty/carey/papers/statmuxing.ps>.

54. Агеев Д.В. Синтез сети передачи данных с кольцевой структурой на магистральном участке с использованием методики эластичной нейронной сети // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. - 2002. - № 125. - С. 165–169.

55. Агеев Д.В. Метод проектирования телекоммуникационных систем с использованием потоковой модели для многослойного графа [Электронный ресурс] / Д.В. Агеев // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 2(2) – Режим доступа: [http://pt.journal.kh.ua/2010/2/1/102\\_ageyev\\_layer.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2010/2/1/102_ageyev_layer.pdf).

56. Capone A. Multi-Layer Network Design with Multicast Traffic and Statistical Multiplexing / A. Capone, G. Carello, R. Matera // Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '07, 26-30 Nov. 2007. – Washington: IEEE, 2007. – P. 2565–2570.

57. Park K. Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation / K. Park, W. Willinger. – New York: Wiley, 2000. – 576 p.

58. Агеев Д.В. Выбор пропускных способностей каналов связи при самоподобной характере передаваемых потоков / Д.В. Агеев, Самир Махмуд, А.В. Чернятьев // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2007. – Вып.148. – С. 87–95.

59. Predicting Quality of Service for Traffic with Long Range Dependence / N. Duffield, J. Lewis, N. O'Connell [et al.] // Proceedings of ICC'95. – Seattle, 1995. – P. 473–477.

60. Зайченко Ю.П. Структурная оптимизация сетей ЭВМ / Ю.П. Зайченко, Ю.В. Гонга. – К.: Техника, 1986. – 168 с.