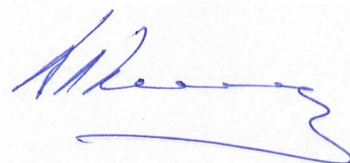


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Донецкий национальный технический университет»  
(ФГБОУ ВО «ДонНТУ»)

*На правах рукописи*

**Климов Владимир Владимирович**



УДК 004.052

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОЦЕНОК КАЧЕСТВА  
РАБОТЫ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ ОПЕРАТОРА МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ**

Специальность 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации,  
статистика (технические науки)

**Диссертация**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Научный руководитель  
кандидат технических наук, доцент  
Лозинская В.Н.

Донецк – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....</b>	<b>5</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>7</b>
<b>РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМНЫХ ВОПРОСОВ В ОБЛАСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОЦЕНОК КАЧЕСТВА РАБОТЫ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ ОПЕРАТОРА МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ, ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ ТЕМЫ И ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....</b>	<b>13</b>
1.1 Анализ технических решений транспортной сети оператора мобильной связи .....	13
1.2 Анализ оценок качества работы транспортной сети оператора мобильной связи .....	16
1.2.1 Анализ критериев, позволяющих оценить качество обслуживания абонентов .....	17
1.2.2 Анализ критериев, позволяющих оценить эффективность использования сетевых ресурсов .....	19
1.3 Анализ существующих методов и алгоритмов прогнозирования оценок качества работы транспортной сети мобильной связи .....	20
1.3.1 Классические предсказатели на основе временных рядов .....	21
1.3.2 Предсказатели на основе искусственной нейронной сети (ИНС).....	22
1.3.3 Вейвлет-предсказатели .....	26
1.3.4 Предсказатель на основе экспериментального метода .....	27
1.3.5 Диффузионные уравнения.....	28
1.4 Формализация требований к показателю эффективности функционирования транспортной сети оператора мобильной связи .....	33
1.5 Цель и задачи исследования .....	43
<b>РАЗДЕЛ 2 АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА ПРОГНОСТИЧЕСКИХ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ.....</b>	<b>46</b>

2.1	Анализ классического подхода к определению оценок качества работы транспортной сети.....	46
2.2	Разработка прогностических моделей оценки объема выделяемой пропускной способности для подключаемого абонента.....	51
2.2.1	Математическая модель трафика на основе нелинейных дифференциальных уравнений для периодических процессов .....	55
2.2.2	Анализ аналитической модели прогнозирования оценок объема выделяемой пропускной способности.....	60
2.2.3	Анализ прогностической модели на основе ИНС .....	65
2.2.4	Модификации аналитической модели .....	70
2.2.5	Разработка интегральной оценки для повышения точности прогнозирования .....	73
2.2.6	Математическая ARFIMA-модель с адаптивным интервалом регулирования .....	76
2.3	Разработка прогнозной модели оценки уровня вносимых задержек при обслуживании подключаемого абонента.....	79
2.4	Выводы по разделу 2 .....	82
<b>РАЗДЕЛ 3 ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОЦЕНОК КАЧЕСТВА РАБОТЫ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ МОС.....</b>		<b>85</b>
3.1	Метод прогнозирования пропускной способности транспортной сети, основанный на оценке скорости подключения.....	85
3.2	Разработка метода прогнозирования оценки надежности транспортной сети .....	88
3.3	Метод прогнозирования оценки размера буфера контроллера базовой станции .....	94
3.4	Разработка комплексного показателя качества работы транспортной сети МОС .....	104
3.4.1	Обоснование функций полезности предоставления ресурсов оператором связи .....	104

3.4.2	Разработка комплексного показателя оценок качества работы транспортной сети МОС .....	112
3.5	Разработка функциональной схемы гибридного метода прогнозирования качества работы транспортной сети.....	113
3.6	Выводы по разделу 3 .....	114
<b>РАЗДЕЛ 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННОГО МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ЕГО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ..</b>		<b>117</b>
4.1	Синтез имитационной модели предложенного метода .....	117
4.2	Экспериментальная оценка предложенного гибридного метода прогнозирования .....	119
4.2.1	Сбор и обработка данных для моделирования.....	119
4.2.2	Экспериментальное оценивание величины вероятности нарушения целостности передаваемых данных .....	122
4.2.3	Экспериментальное оценивание точности разработанного комплексного показателя оценок качества работы транспортной сети МОС .....	125
4.3	Практическое значение полученных результатов.....	129
4.4	Рекомендации по использованию результатов работы .....	131
4.5	Выводы по разделу 4 .....	135
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>		<b>137</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>		<b>139</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Блок-схема алгоритма прогнозирования оценок качества транспортной сети МОС .....</b>		<b>154</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б Описание и листинги программ, предназначенных для моделирования гибридного метода прогнозирования качества работы транспортной сети.....</b>		<b>155</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В Документы, подтверждающие эффективность использования результатов работы .....</b>		<b>163</b>

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

AR – autoregressive; авторегрессионный

ARFIMA – autoregressive fractionally integrated moving average; авторегрессионное фрактальное интегрированное скользящее среднее

ARMA – autoregressive moving average; авторегрессионное скользящее среднее

BPSK – binary phase-shift keying; двухпозиционная фазовая модуляция

FTTT – fiber to the tower; оптоволокно к вышке телекоммуникаций

HMM – hidden Markov model; скрытая Марковская модель

IntServ – integrated service; интегрированные услуги

ICI – inter cell interference; помехи, возникающие между сотами, при работе на однокровых частотах

IP – Internet protocol;

IPTV – Internet protocol television; протокол вещания телесигнала по сетям IP

IoT – internet-of-things; Интернет-вещей

LOS – line of sight; зона прямой видимости

LTE – long time evolution; долгосрочная эволюция

MAPE – mean absolute percentage error; средняя абсолютная ошибка в процентах

MA – moving average; скользящее среднее

MPLS – multiprotocol label switching; многопротокольная коммутация по меткам

NR – new radio;

NLOS – non-line of sight; вне зоны прямой видимости

QoS – quality of service; качества обслуживания

SLA – service level agreement; соглашение об уровне обслуживания

SINR – signal to interference noise ratio; соотношение сигнал/шум

4G – the 4th generation;

5GC – the 5th generation core;

VoIP – voice over internet protocol; передача голосовой информации по сетям IP

WDM – wavelength-division multiplexing; мультиплексирование с разделением по длине волны

АКФ – автокорреляционная функция;

ИНС – искусственная нейронная сеть;

МОС – мобильный оператор связи;

СМО – система массового обслуживания;

ТКС – телекоммуникационная сеть;

ЧНН – час наибольшей нагрузки.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Современный оператор мобильной связи осуществляет передачу разнородного трафика в условиях ограниченности сетевых ресурсов, обеспечивая при этом требуемые параметры качества обслуживания (QoS, Quality of Service). Если на этапе подключения пользователя ему выделяется сетевой ресурс определенной величины, то на этапе передачи информации от контроллера базовой станции к магистральной сети из-за высокой концентрации пользователей (транспортная сеть мобильного оператора связи (МОС)), та же задача становится сложнее. В этом случае задачу выделения сетевых ресурсов можно решить несколькими способами. Одним из способов является использование технологий передачи данных, которые обеспечивают достаточное количество ресурсов (оптической или микроволновой передачи). Другим – перераспределение имеющихся ресурсов, основанное на оценках качества функционирования транспортной сети МОС. Последние зависят от таких факторов, как обеспечение качества предоставляемых услуг и эффективность использования сетевых ресурсов. Так возникают две научно-исследовательские задачи. Первая – выбор и постановка требований к соответствующим оценкам качества работы сети. Стоит отметить, что разнородность и различный вес последних, при формировании комплексной оценки, делает эту задачу достаточно нетривиальной. Вторая – возможность прогнозирования вышеперечисленных оценок, в зависимости от количества подключаемых пользователей и типа формируемого ими трафика. Из-за разнородной природы исследуемых оценок качества использование единой модели прогнозирования ухудшает ее точность. Это, в свою очередь, приводит к получению неверных оценок качества работы транспортной сети МОС, т.е. принятию неверных решений.

Таким образом, повышение качества работы транспортной сети, вследствие использования комплексного показателя качества, за счет обоснования метода прогнозирования, является актуальной задачей, имеющей большое значение для

операторов мобильной связи.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблемам прогнозирования в целом посвящены фундаментальные работы в областях: экономической теории (Соломатин А.Н., Борисевич В.И., Vox G., Jenkins G.M., и др.); телекоммуникаций (Ложковский А.Г., Петров В.В., Шелухин О.И., Reinsel G., Rose O.); систем управления (Милов Д.С., Кривулин Н.К., Жбанов С.А., Бессараб В.И., Francois Vaccelli и др.). Однако, в данных исследованиях имело место решение частных задач, в то время как развитие технической базы транспортной сети МОС обуславливает актуальность системного подхода к разработке обобщающих методов управления, прогнозирования, оценки качества, эффективности и надежности функционирования, отличающихся универсальностью и предполагающих комплексное применение математических аппаратов прогнозирования.

**Цели и задачи исследований.** Целью работы является повышение эффективности функционирования транспортной сети мобильного оператора связи за счет научного обоснования и практического применения гибридного метода прогнозирования оценок качества, формирующих комплексный показатель.

Для достижения цели поставлены и решены следующие **задачи**.

1. Проанализировать состояние решения проблемных вопросов в области прогнозирования оценки качества работы транспортной сети оператора мобильной связи, обосновать актуальность темы и цель исследования.

2. Выполнить анализ и разработать прогностические и математические модели метода прогнозирования.

3. Обосновать метод прогнозирования оценок качества работы транспортной сети МОС.

4. Выполнить моделирование и оценить эффективность предложенного метода прогнозирования, разработать рекомендации по его практическому использованию.



**Объект исследования.** Процесс обработки информации в задачах диагностики и прогнозирования параметров сложных систем.

**Предмет исследования.** Предметом исследования являются методы статистического и дискретно-событийного анализа данных в условиях динамически-изменяемых исходных параметров.

**Научная новизна полученных результатов.**

1. Впервые обоснованы требования к формированию комплексного показателя качества работы сети, учитывающего различные оценки на основе функций «полезности», что позволило учесть разнотипные показатели в рамках единого критерия с обеспечением требуемого качества обслуживания.

2. Получил дальнейшее развитие метод прогнозирования оценки величины выделяемой пропускной способности транспортной сети, что позволило увеличить эффективность использования канальных ресурсов.

3. Впервые обосновано применение метода оценки размера буфера очередей контроллера базовой станции, основанного на использовании базиса дискретно-событийных систем, что позволило повысить точность моделирования процесса обслуживания трафика транспортной сети МОС.

**Теоретическая значимость работы** состоит в обобщении и дальнейшем развитии теории и методов прогнозирования оценок качества работы транспортной сети МОС за счет разработки и усовершенствования прогностических моделей последних. Использование предложенных моделей и методов позволило повысить точность прогнозирования оценок качества, за счет использования различных методов на различных участках транспортной сети, т.к. использование существующих моделей и методов не обеспечивало учет особенностей их функционирования: динамических стратегий обслуживания очередей и оценки пропускной способности при обслуживании трафика с заданными параметрами качества обслуживания.

**Практическая значимость работы** заключается в:

— обосновании, применяемых на практике, оценок критериев качества работы транспортной сети МОС;

- разработке рекомендаций по практическому применению результатов решения задачи повышения эффективности работы транспортной сети МОС за счет перераспределения имеющихся сетевых ресурсов, что приводит, к уменьшению капитальных затрат на оптимизацию сети;
- разработке программного комплекса, реализующего предложенный в диссертации метод прогнозирования оценок качества работы транспортной сети МОС.

Полученные результаты могут быть использованы научно-исследовательскими, проектными организациями, телекоммуникационными компаниями при оптимизации и проектировании сетей стандарта от 4G и выше. Практическая реализация результатов работы подтверждается справкой о внедрении в учебный процесс ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» (справка № 30-12/64 от 29.08.2025 об использовании в учебном процессе при проведении лабораторных работ по дисциплине «Математическое моделирование устройств и систем» и «Математические модели сигналов и помех» для студентов направления подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»), справкой о внедрении в ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ «УГЛЕТЕЛЕКОМ» (справка № 1314/02 от 27.08.2025 о внедрении результатов исследований).

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач использованы методы, основанные на системном анализе, положениях теории вероятностей и математической статистики, дискретно-событийных систем, методы анализа результатов эксперимента, математического и имитационного моделирования.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Обоснованный в работе метод оценки величины выделяемой пропускной способности, отличающийся от существующих использованием прогностической ARFIMA-модели, обеспечивает повышение эффективности использования

канальных ресурсов до 12% при заданных значениях параметров качества обслуживания.

2. Применение дискретно-событийной модели работы планировщика в базисе Max-Plus алгебры, учитывающей задержки на обработку запросов, позволяет формализовать процесс управления очередями в пространстве состояний, что повышает точность прогнозирования на величину до 10,8%.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректностью формулировки математического описания поставленных задач и результатами математического моделирования при их решении в компьютерной среде с применением специализированного программного обеспечения.

По направлению исследований, содержанию научных положений и выводов, существу полученных результатов диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки) в частности: п. 1. «Теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»; п. 3 «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»; п. 11 «Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества, надежности функционирования сложных систем управления и их элементов».

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректностью формулировки математического описания задачи и результатами математического моделирования при решении поставленных задач в компьютерной среде с применением специализированного программного обеспечения.

По направлению исследований, содержанию научных положений и выводов, существу полученных результатов диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и

обработка информации, статистика (технические науки) в частности: п. 1. «Теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»; п. 3 «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»; п. 11 «Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества, надежности функционирования сложных систем управления и их элементов».

Основные положения диссертации опубликованы в 13 научных работах, в том числе: 2 работы в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук; 6 работ в рецензируемых научных изданиях, учредителями которых являются образовательные организации высшего образования и научные организации, расположенные на территории Донецкой Народной Республики; 5 – по материалам конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа содержит 165 страниц машинописного текста и состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 103 источников на 15 страницах и 3 приложений. Основной текст, изложенный на 138 страницах, иллюстрируется 41 рисунком и содержит 1 таблицу.

**РАЗДЕЛ 1****АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМНЫХ ВОПРОСОВ В  
ОБЛАСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОЦЕНОК КАЧЕСТВА РАБОТЫ  
ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ ОПЕРАТОРА МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ,  
ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ ТЕМЫ И ЦЕЛИ  
ИССЛЕДОВАНИЯ**

Под транспортной сетью (backhaul) оператора мобильной связи в данной исследовательской работе понимается сеть, соединяющая сети уровня ядра и радиодоступа в мобильной сети. Хотя последние несколько лет научный интерес представляет концепция fronthaul-сети, транспортной сети, образующейся при соединении макроячейки с малыми ячейками. Вышеперечисленные концепции охватываются общим термином мобильной транспортной сети. Для того, чтобы увеличить эффективность работы транспортной сети в целом и backhaul-сети в частности, внедряются инновации, направленные на снижение нагрузки на транспортную сеть: архитектурные изменения в антенне (также называемой радиоблоком в 4G) и контроллере (также называемом цифровым блоком в 4G).

**1.1 Анализ технических решений транспортной сети оператора мобильной связи**

Существует ряд рыночных тенденций, которые приводят к появлению новых проблем и требований, которым должна отвечать транспортная инфраструктура сетей мобильных операторов связи. В LTE, который известен как LTE-Advanced Pro или 4.5G, существует ряд технических новшеств, которые обеспечивают такие улучшения, как улучшенная пиковая пропускная способность и более высокая энергоэффективность для соединений Интернета вещей (IoT). Сеть 5G будет включать в себя как

новую технологию радиопередачи (NR), так и новое ядро сети 5G (5GC). Более высокие частоты обеспечивают более широкую полосу пропускания канала при доступе, но это приводит к меньшим размерам сот. Оба имеют значение для транспортной сети [1]. Одной из ключевых особенностей сети 5G является концепция «разбиения по сетям», при которой инфраструктура физической сети может быть разделена на логические сети («сегменты») в сети радиодоступа и в ядре 5G, которые ориентированы на потребности конкретного приложения или варианта использования (рисунок 1.1).

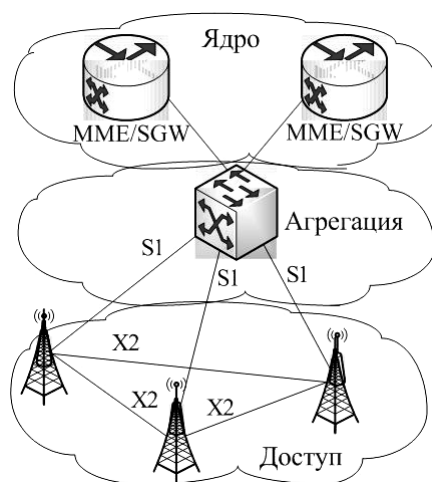


Рисунок 1.1 – Архитектура backhaul-сети

В предложенной архитектуре соединение с центральным узлом организовано с помощью уровня агрегации. Это предполагает создание динамической полносвязной backhaul-сети на основе IP. Пространство сети разбито на три уровня: уровень доступа (access), уровень агрегации (aggregation) и уровень ядра (core). Трафик передается по протоколу IP с помощью интерфейсов X2 и S1. Интерфейс X2 используется для обмена сообщениями между базовыми станциями, исключая передачу трафика на контроллер. Как только данными поступают в магистральную часть сети, производится разделение трафика для его качественного обслуживания. Такая архитектура позволяет одновременно обрабатывать трафик от различного вида приложений пользователей.

Как итог, рост трафика LTE привел к тому, что операторы мобильной связи все в большей степени зависят от развертывания малых сот [2].

Существует ряд технических решений, используемых операторами мобильной связи для транспортных сетей, включая как проводные, так и беспроводные решения. Основной технологией транспортной сети для 2G/3G была передача по медному кабелю. В основе такой транспортной сети лежит протокол T1/E1, который поддерживает скорость от 1,5/2 Мбит/с. Тем не менее, медные линии нелегко масштабировать, чтобы обеспечить адекватную полосу пропускания на расстоянии более нескольких сотен метров для поддержки использования широкополосного LTE, и сценарии трафика 5G будут достаточно сложными для поставщиков мобильных услуг. Поэтому, поскольку требования к пропускной способности становятся более обременительными, транспортная сеть на основе меди стала нечасто используемым решением, и операторы все чаще предпочитают волоконно-оптические кабели там, где они есть (например, в городских центрах). Транспортная сеть на основе оптоволоконного кабеля является основной для транспортных сетей МОС и, при определенных обстоятельствах (невозможности организации) уступает, только микроволновой транспортной сети. Даже несмотря на то, что волокно имеет значительную пропускную способность, можно использовать несколько дополнительных методов, чтобы компенсировать любые ограничения и, по существу, сделать использование волоконно-оптической сети перспективными. Эти методы включают технологию мультиплексирования с разделением по длине волны (WDM), которая позволяет передавать несколько оптических сигналов параллельно, передавая каждый сигнал на другой длине волны. Трафик, генерируемый LTE, усилил спрос на волоконно-оптические каналы до вышки (FTTT) и вызвал необходимость операторам мобильной связи обновить многие аспекты своих транспортных сетей до волоконно-оптической сети Carrier Ethernet. Основными ограничениями оптического волокна являются стоимость и логистика развертывания волокна (воздуховодов и т. д.), хотя

стоимость волокна снизилась в течение последних нескольких лет. Технология микроволнового транспортного канала является наиболее используемой из-за сочетания ее возможностей и относительной простоты развертывания (то есть не требуется траншей/каналов). Большинство операторов мобильной связи в значительной степени полагаются на микроволновые транзитные решения в диапазонах от 7 ГГц до 40 ГГц в дополнение к более высоким микроволновым диапазонам, таким как V-диапазон (60 ГГц) и E-диапазон (70/80 ГГц). Микроволновая передача может использоваться в режиме «прямой» (LOS) или «непрямой» (NLOS) видимости, что делает ее идеальной для использования в последовательных, ячеистых или кольцевых топологиях для обеспечения устойчивости и/или покрытия. Основным недостатком является то, что для микроволновой транспортной сети требуется лицензия, за исключением нелицензируемого V-диапазона и, в меньшей степени, E-диапазона, который имеет небольшую лицензию. Также возможно объединить низкочастотный микроволновый диапазон с высокочастотным микроволновым диапазоном для достижения высокой пропускной способности на больших расстояниях и повышенной доступности. Спутниковая транспортная сеть является специализированным решением для МОС и используется в приграничных районах (например, в отдаленных сельских районах), а иногда и в качестве экстренной/временной меры (например, в зоне бедствия или вместо микроволновой связи, ожидая одобрения лицензии) [3].

## 1.2 Анализ оценок качества работы транспортной сети оператора мобильной связи

Качество работы любой сети передачи данных оценивается исходя из таких факторов как: качество обслуживания абонентов, эффективность использования сетевых ресурсов, эффективность управления сетью с целью перераспределения имеющихся сетевых ресурсов, эффективность



энергопотребления. Для того, чтобы оценивать все вышеперечисленное, необходим анализ текущего состояния транспортной сети оператора мобильной связи, включая оборудование и линии связи.

### 1.2.1 Анализ критериев, позволяющих оценить качество обслуживания абонентов

Как упомянуто выше, необходимость обеспечения качества обслуживания является основным требованием к решениям по обеспечению эффективности работы сети. Одним из первых решений для повышения эффективности использования сетевых ресурсов с обеспечением качества обслуживания стало объединение трафика со схожими характеристиками в поток, и уже в рамках потока добиваться выполнения поставленных требований. Необходимый сервис описывается многими параметрами. В данной научно-исследовательской работе будут использоваться следующие:

- пропускная способность ( $B_i$ ), описывает номинальную способность среды передачи информации (определяет максимально допустимую скорость передачи);
- задержка при передаче пакета ( $D_i$ ). Как критически важные приложения для 5G, так и увеличенная потоковая передача видео приводят к ужесточению требований к задержке «из-конца-в-конец» и влияют на суммарную задержку в транспортной сети. Например, ограничение задержки «из-конца-в-конец» в 100 мс подразумевает, что задержка вдоль всей транспортной сети составляет может составлять примерно 10 мс, только волоконно-оптические и микроволновые линии связи смогут поддерживать такие требования малой задержки. Если используются транспортные каналы с более высокой задержкой (например, спутниковые линии связи), то такая транспортная сеть будет предоставлять только услуги 2G/3G и услуги LTE, не чувствительные к задержке;

– уровень потерь пакетов ( $Pl_i$ ), определяет количество пакетов, отбрасываемых во время передачи трафика [4, 5, 6].

Для достижения индивидуальных требований пользователя по качеству обслуживания требуются специальные QoS-механизмы. А для поддержания требуемого класса обслуживания для пользователя, QoS-службам необходимо скоординированное использование нескольких QoS-механизмов одновременно. Таким образом, процесс обеспечения качества обслуживания в целом – комплексная задача, которая частично или полностью реализована в различных моделях обеспечения качества обслуживания.

Обеспечение параметров качества обслуживания включает в себя обширный класс механизмов, успешное внедрение которых позволяет максимально оптимизировать производительность сетей и обеспечить стабильное функционирование приложений.

Методы повышения эффективности использования сетевых ресурсов, кроме обеспечения методов и алгоритмов QoS могут основываться на методах управления этими ресурсами. Так, при адаптивных методах, управление происходит только таким параметром, изменение которого приводит к наибольшей эффективности. Адаптация происходит путем обратной связи с управляемым параметром.

На сегодняшний день известны три основные модели обеспечения QoS: лучшая возможность [7, 8], интегрированное обслуживание [9, 10], дифференцированное обслуживание [11, 12, 13]. Каждая из моделей предлагает свои средства по обеспечению QoS. Так, в модели Best Effort гарантируется только один из показателей качества обслуживания – пропускная способность канала для обслуживания определенного вида трафика. Очевидно, что для трафика реального времени этого недостаточно, так как основными показателями качества обслуживания для трафика таких приложений являются величины задержек передачи пакетов и их джиттера. С целью устранения этого недостатка были разработаны две другие модели. Особенностью модели интегрированного обслуживания является

использование протоколов резервирования ресурсов, что позволяет обеспечивать сквозную поддержку QoS (на промежуточных узлах). Так, вдоль всего пути от узла-отправителя к узлу-источнику резервируется необходимая пропускная способность. Основная концепция модели дифференцированного обслуживания состоит в разграничении сети на отдельные домены, внутри каждого из которых проводится единая политика по классификации служб передачи пакетов. Пакеты, поступая в пограничный маршрутизатор, классифицируются в соответствии с принятой в домене политикой обслуживания и передаются к следующему, уже с гарантированным соблюдением определенного набора характеристик.

Каждая из предложенных моделей может изменять эффективность работы сети в той или иной мере. Так, DiffServ позволяет существенно снизить затраты на стоимость оборудования сети, но при этом может относительно гарантировать только величину пропускной способности для потоков с высокими требованиями по QoS. Модель IntServ сложно реализовать на уже существующем оборудовании, хотя именно эта модель поддерживает гарантированное качество обслуживания. Решением проблем, перечисленных выше, является использование комбинации этих двух моделей, в зависимости от типа сети, количества пользователей сети и требуемой гибкости. Кроме того, для применения QoS-механизмов в динамике необходимо иметь возможность предсказывать их параметры [14, 15].

### 1.2.2 Анализ критериев, позволяющих оценить эффективность использования сетевых ресурсов

К критериям, позволяющим оценить качество работы транспортной сети оператора мобильной связи, относятся:

- утилизация каналов связи ( $Ul_i$ ) характеризует меру эффективности их использования: в случае достижения порогового значения

считается, что физический канал перегружается, т.е. общая эффективность транспортной сети МОС резко снижается;;

- оценка надежности транспортной сети ( $R_i$ ). Вопросам надежности, как фактора, влияющего на эффективность транспортной сети, посвящены работы следующих исследователей [16, 17, 18]. В работе [19] авторы рассчитали внутриканальные межсотовые помехи (ICI) в HetNets с ненадежной транспортной сетью и скоординированной многоточечной связью и считалось, что это уменьшает интерференцию. В [20] исследуется влияние ненадежной транспортной сети на кооперативные беспроводные системы. Вероятность сбоя селективной радиосети конечного размера с ненадежной транспортной сетью исследовалась [21]. Когнитивная сеть с ненадежной транспортной сетью исследовалась в [22], и асимптотический анализ показал, что эффективность, в основном, достигалась за счет надежности транспортной сети. Во всех, вышеупомянутых исследованиях надежности транспортной сети является ключевым фактором эффективности работы сети;

- безопасность ( $Sf_i$ ).

Вышеперечисленные показатели обычно получают либо экспериментально, либо как произведение соответствующих показателей определенного вида трафика, либо на основе их прогнозирования [23].

### 1.3 Анализ существующих методов и алгоритмов прогнозирования оценок качества работы транспортной сети мобильной связи

Прогнозирование сетевого трафика, как единого потока либо как совокупность трафика разного вида (эластичный или неэластичный) дает возможность оценить эффективность работы транспортной сети мобильного оператора связи. Следовательно, это изучено исследователями и предложено

много различных предсказателя трафика. Можно разделить эти предсказатели на три широких класса:

- предсказатели на основе временных рядов;
- предикторы на основе нейронных сетей;
- предсказатели на основе вейвлет-преобразования.

### 1.3.1 Классические предсказатели на основе временных рядов

Предсказатель по последнему значению. Это самый простой предсказатель, который хорошо работает во многих приложениях. Этот предсказатель использует последнее наблюдаемое значение, как прогнозное для следующего интервала [24].

Скользящее среднее ( $MA$ ). В этом методе среднее значение из  $n$  прошлых наблюдений используется в качестве прогноза для следующего интервала. Этот метод дает одинаковый вес всем  $n$  предыдущим наблюдениям. Количество использованных в прошлом наблюдений ( $n$ ) называется порядком  $MA$ .

Двойное экспоненциальное сглаживание. Экспоненциальное сглаживание присваивает экспоненциально меньшие веса старым наблюдениям. Одиночное экспоненциальное сглаживание работает плохо, если есть тенденция в данных. Тенденция означает, что среднее значение временного ряда увеличивается или уменьшается со временем.

Авторегрессия ( $AR$ ). Следующим значением ряда является взвешенная сумма предыдущих наблюдений. Веса называются коэффициентами авторегрессии. Авторегрессии аналогичны регрессии с небольшой разницей. Регрессионный анализ дает наилучшее математическое соотношение между зависимыми и независимыми переменными. Модель с порядком  $n$  представляется как  $AR(n)$ .

Авторегрессионное скользящее среднее ( $ARMA$ ). Эта модель использует скользящее среднее ( $MA$ ) предыдущих слагаемых ошибок в

дополнение к авторегрессии ( $AR$ ). Значение ошибки определяются как разница между фактическими и прогнозируемыми значениями. Окончательный прогноз – это сумма компонент авторегрессии и скользящего среднего. Модель  $ARMA$  с порядком  $AR$   $n$  и порядком  $MA$   $m$  обозначается, как  $ARMA(n, m)$ .

### 1.3.2 Предсказатели на основе искусственной нейронной сети (ИНС)

Искусственные нейронные сети – математические модели, синтезированные по принципу функционирования биологических нейронных сетей – сетей нервных клеток живого организма. Системы, архитектура и принцип действия базируется на аналогии с мозгом живых существ. Ключевым элементом этих систем выступает искусственный нейрон как имитационная модель нервной клетки мозга – биологического нейрона. ИНС представляет собой систему соединенных и взаимодействующих между собой искусственных нейронов. Структура нейронной сети представлена на рисунке 1.2.

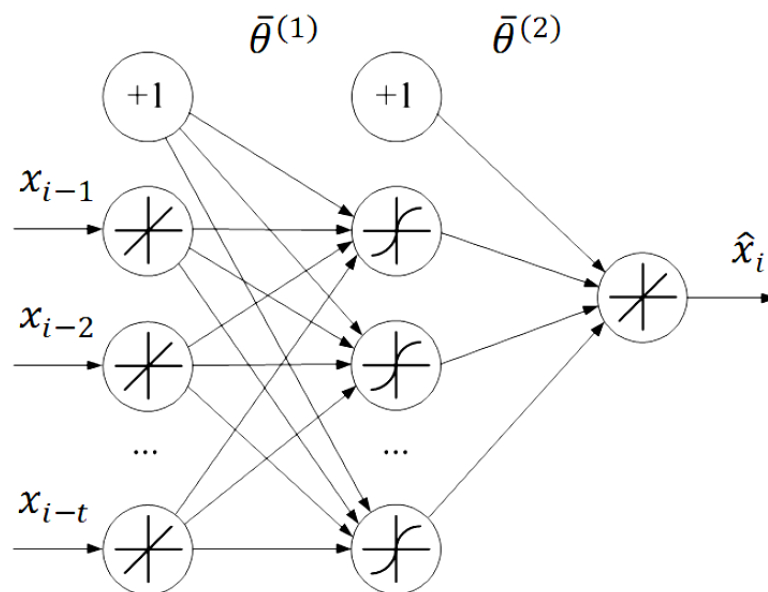


Рисунок 1.2 – Структура ИНС

Нейроны в сети расположены слоями, которые соединяются синаптическими связями. У каждого нейрона может быть несколько входов и несколько выходов, которыми он присоединяется к другим нейронам. Нейрон выполняет простую математическую операцию, чаще всего – сложение, после чего результат передается в функцию активации – любой непрерывной линейной или нелинейной функции, которая рассчитывает выходной сигнал искусственного нейрона [25].

Нейронные сети не программируются в обычном понимании этого слова, они обучаются. Возможность обучения – одно из основных достоинств нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Технически, обучение заключается в нахождении коэффициентов связи между нейронами с использованием оптимизационной функции. В процессе обучения нейронная сеть способна обнаруживать сложные зависимости между входными данными и выходными, а также выполнять обобщения. Это означает, что в случае успешного обучения, сеть сможет возратить верный результат на основании данных, которые отсутствовали в обучающей выборке, а также неполных, зашумленных данных.

Соответственно с теоремой Цыбенко [26], ИНС прямой связи с одним скрытым слоем, функция активации которого сигмоидальная, можно аппроксимировать любую непрерывную функцию многих переменных с любой точностью. Условиями является количество нейронов скрытого слоя и удачный подбор параметров ИНС.

В работе исследование проводится с помощью нейросети с рациональной сигмоидальной функцией активации скрытого слоя, (1.1):

$$l(x) = \frac{x}{|x| + 1}. \quad (1.1)$$

Причиной ввода нелинейности является математически доказанная возможность получить как угодно точное приближение любой непрерывной

функции многих переменных, используя операции сложения и умножения на число, суперпозицию функций, линейные функции, а также одну произвольную непрерывную нелинейную функцию одной переменной [27].

Рациональная сигмоида является наиболее эффективной из сигмоидальных функций активации, потому что для ее расчета необходимо выполнение только трех математических операций, что позволяет существенно сократить вычислительную сложность метода обратного распространения ошибки, у нее простое выражение производной:

$$l'(x) = \frac{1}{(|x| + 1)^2}. \quad (1.2)$$

ИНС работает согласно алгоритма прямого распространения. Нейроны в скрытом слое суммируют все сигналы входного слоя и нейрона смещения, умноженные на весовые коэффициенты нейронных связей  $\theta_i^{(1)}$ . В векторном виде прямое распространение для логистической функции активации в скрытом слое и линейной функции активации во входном слое имеет вид:

$$\alpha^{(2)} = l(\theta^{(1)} x), \quad (1.3)$$

$$\hat{x} = \theta^{(2)} \alpha^{(2)}. \quad (1.4)$$

Обучение ИНС проводится на основе метода обратного распространения ошибки. Метод состоит в динамичном изменении весовых коэффициентов синаптических связей, в зависимости от ошибки прогнозирования на выходе ИНС [28]. Целью алгоритма обратного распространения ошибки является минимизация функции ошибки. В данной работе используется функция ошибки, рассчитанная методом наименьших квадратов:



$$J(\theta) = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (\hat{a}_i - a_i)^2, \quad (1.5)$$

где  $\hat{a}_i$  – спрогнозированное значение временного ряда;

$a_i$  – фактическое значение числового ряда;

$m$  – количество элементов начальной обработки.

Алгоритм поделен на эпохи. Эпоха начинается с прямого распространения сигнала от входного слоя согласно алгоритма прямого распространения.

Градиент для каждого весового коэффициента нейросети вычисляется через ошибку прогнозирования (1.6)-(1.9):

$$\delta_p^{(3)} = (\alpha_p^{(3)} - x_p); \quad (1.6)$$

$$\delta^{(2)} = (\theta^{(2)})^T \delta^{(3)} \cdot l'(\theta^{(1)} x); \quad (1.7)$$

$$\Delta^{(l)} = \sum \delta_p^{(3)} (\alpha^{(l)})^T; \quad (1.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta_{ij}^{(l)}} J(\theta) = \frac{1}{m} \Delta_{ij}^{(l)}. \quad (1.9)$$

В процессе обучения ИНС, выполняется регуляризация – к функции ошибки добавляется сумма весовых коэффициентов синпатических связей умноженная на параметр регуляризации  $\gamma$ , (1.10):

$$J(\theta) = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (\hat{\alpha}_i - \alpha_i)^2 + \frac{\gamma}{2m} (\sum \sum \theta^{(1)} + \sum \sum \theta^{(2)}). \quad (1.10)$$

Регуляризация выполняется для предотвращения переобучению – это позволяет весовым коэффициентам синаптических связей принимать очень большие значения, в результате сеть лучше обрабатывает данные, которые

поступают на вход. Важным моментом в процессе изменений весовых коэффициентов является требование не изменять весовые коэффициенты связей нейронов смещения [29].

На входы ИНС подаются  $N$  предварительных нормализованных средних значений прогнозируемого трафика. Нормализация данных выполняется для исключения постоянной составляющей, приведение входных данных к единому масштабу и предотвращение обучения сети со слишком малыми или большими весовыми коэффициентами, что может привести к худшей работе оптимизированной функции.

### 1.3.3 Вейвлет-предсказатели

Прогнозирование с использованием вейвлетов включает три этапа: вейвлет-разложение, расширение сигнала и восстановление сигнала [30]. Вейвлет-разложение выполняется с использованием прототипа вейвлета, называемого анализирующим вейвлетом или материнским вейвлетом. На этом этапе сигнал делится на низкочастотный выходной, называемый приближением, и высокочастотный выходной, называемый подробностью. Функция вейвлет-разложения может быть применена рекурсивно к приближениям, чтобы получить дополнительные уровни приближений и деталей.

Окончательный результат можно представить в виде дерева, так что, что при движении вниз уровень за уровнем, можно увидеть более и более грубую версию сигнала. На каждом уровне, разложение включает свертку сигнала с низкочастотным и высокочастотным вейвлет-фильтрами и субдискретизацией результатов для получения коэффициентов приближения и деталей, соответственно. На любом уровне исходный сигнал представляет собой сумму приближения на этом уровне и детализаций на всех более низких уровнях, т.е. для трехуровневого разложения сигнала  $x$ ,  $x = a_3 + d_3 + d_2 + d_1$ . Гладкая часть  $x$  захватывается  $a_3$ , а детали захватываются  $d_3, d_2$  и  $d_1$ . Сигналы  $a_3$  и  $d_3$  получаются обратным вейвлет-преобразованием

коэффициентов  $ca_3$  и  $cd_3$ , соответственно. Обратное вейвлет-преобразование (дополнительные операции свертки) используется для получения сигналов  $a_i$  и  $d_i$ .

#### 1.3.4 Предсказатель на основе экспериментального метода

Производительность всех методов, описанных выше, оценивается с использованием реальных сетевых трассировок. Исходная трассировка содержит время поступления каждого пакета. Рассчитывается скорость трафика для каждого временного интервала  $t$  и прогнозируется скорость передачи для следующего интервала. Трассировка делится на две части. Первые 25% трассы составляют тренировочный набор, а оставшиеся используются для проверки точности прогноза. На этапе обучения определяются оптимальные параметры модели, чтобы ошибка между прогнозируемыми и фактическими значениями сводилась к минимуму. На этапе вычисления, выходные данные прогнозируются с использованием входных (тестовых) данных, которые не использовались для обучения, и вычисляется ошибка между прогнозируемыми и фактическими значениями.

Так как трафик современных телекоммуникационных сетей – самоподобный [31], на данный момент не существует единой универсальной математической модели трафика ТКС. В работе [32] 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. В работе [33, 34] на основе анализа большого числа работ по исследованию трафика в IP сетях приведена классификация трафика, и каждому виду трафика сопоставлен закон распределения. В этой же работе утверждается, что для описания процессов в современных ТКС наиболее широко применяются три вида распределений: Парето, Вейбулла и логнормальное. Рассмотрим

прогностический поход к определению характеристик поступающего трафика. Итак, согласно работам [35, 36] в общем виде прогностическая модель трафика выглядит следующим образом, (1.11):

$$Y(t) = T(t) + S(t) + C(t) + \varepsilon(t), \quad (1.11)$$

где  $T(t)$  – тренд, который представляет собой плавно изменяющуюся составляющую;

$S(t)$  – сезонная составляющая;

$C(t)$  – циклическая составляющая;

$\varepsilon(t)$  – случайная составляющая.

Тренд, сезонная и циклическая составляющие могут быть определены методами статистического анализа. Определенную сложность вызывает случайная составляющая, т.к. именно она формирует динамический характер трафика современных сетей. Математическое описание этой составляющей может быть получено несколькими типами моделей. В работе [37] представлено описание случайной составляющей на основе модели ARFIMA, сочетающей в себе свойства авторегрессионных моделей и самоподобных процессов. По этой причине эта модель выбрана базовой для дальнейшего прогнозирования самоподобных процессов в ТКС.

### 1.3.5 Диффузионные уравнения

Разработкой модели трафика на основе диффузионных уравнений активно занимается школа Института теоретической и прикладной информатики Польской Академии наук под руководством известного польского ученого, профессора, директора Тадеуша Чахурски.

В своей работе [38] он представил метод для оценки аналитических характеристик синхронных оптических пакетно-коммутируемых

магистральных сетей. Предлагаемый в этой статье способ используется для сети с произвольной топологией, построенной из узлов любой степени с любым числом длин волн, а также способный разрешать определенные отклонения. Способ обеспечивает не только общие результаты, такие как использование волокна, но и подробные результаты относительно того, что такое оценка перемещения пакетов. Также в этом исследовании проведен анализ стационарной производительности сети, загруженной независимыми потоками. Справедливым образом, при управлении доступом, определяется столько пакетов, сколько существует доступных выходных слотов. Основываясь на том факте, что проведено большое количество тестирований для случайно сгенерированных наборов тестов, ученые утверждают, что предложенный метод дают достаточно точные результаты.

Моделирование поступающего трафика на основе диффузии – большая область знания на данный момент [39]. В предложенной исследовательской работе использовался обобщенный подход, который принят и использован в некоторых подходах для оценки контроля некоторых механизмов контроля трафика. Диффузионное приближение, представленной с точки зрения инженерии, подчеркивая его полезность и комментируя многочисленные проблемы его реализации. Оно является методом для моделирования поведения одной очереди на узле либо поведение всех очередей по сети. Данный факт позволяет включить в математическую модель, например трафика, общее время обслуживания, общие (также коррелированные) поступающие потоки и исследовать переходные состояния.

В современных сетях интерес представляет исследование присутствия пульсирующих потоков, моделирование которых возможно с данным методом.

В работе [40] показан такой факт, что одновременная загрузка с нескольких виртуальных машин или сетевых устройств создает большую нагрузку на сетевую инфраструктуру. В большой сети, которая состоит из большого количества виртуальных машин, координация перегрузок и

регистрация устройств не нужна. В статье представлена простая аналитическая модель оцененного распределения времени загрузки, которая проверяется в сравнении с имитационной моделью и обеспечивает анализ воздействия некоторых параметров на общее время загрузки при перегрузках сети.

Использование диффузионного приближения в анализе переходных моделей очередей, которые используются для исследования некоторых аспектов передачи данных в Интернете рассматривается в работе [41]. В классической теории массового обслуживания анализ переходных состояний является достаточно нетривиальным, несмотря на то, что большинство исследований формализовано к модели СМО М/М/1 (одноканальная модель СМО с поступающим простейшим потоком и временем обслуживания, распределенным по Пуассоновскому закону) или ее модификаций. Однако, потоки данных отличны от потоков вызовов/сообщений и зависят от времени. Для backhaul-сетей необходимо сосредоточиться на анализе переходных состояний, который необходим для определения динамики поступающих ТСП-потоков. Активное управление очередями последних осуществляется для того, чтобы оценить изменения приоритетных очередей. Такая модель обеспечивает дифференциальный механизм обеспечения параметров качества обслуживания. В работе, с использованием различных моделей, представлены потенциалы диффузного приближения и сравнение его с альтернативными методами: Марковские уравнения, которые численно решаются и приближения на основе потокового (fluid-flow) моделирования. На основе предыдущих исследований представлена модель СМО для оценки эффективности большой системы базы данных в страховой компании. Система состоит из сервера с базой данных и локальной сети с определенным количеством терминалов, где сотрудники компаний работают с программами, которые вводят документы или получают их из базы данных. В работе [42] освещается модель клиентской деятельности. Измерения были собраны внутри рабочей системы: определены фазы продуктивности

приложения каждого пользователя и измерялась их продолжительность. Собранные данные использовались для построения синтетической модели программы деятельности, которая потом использовалась для предсказания поведения системы для случая увеличения количества пользователей. Здесь использовалось моделирование, Марковские и диффузионные модели, их сравнение, основанное на реальных данных, что позволило лучше верифицировать полезность конкретных методов.

Использование скрытых Марковских моделей для генерации самоподобного трафика представлено в [43]. Известные Bellcore-последовательности используются в качестве обучающих последовательностей для того, чтобы определить параметры НММ-модели. Производительность представленной модели на других частях последовательностей. Тогда авторы использовали обученную НММ-модель с данными Bellcore в качестве модели поступающего трафика.

Модель диффузионного приближения, которая используется для исследования очереди с конечной мощностью, представлена в [44]. Обычно предполагается, что размер очереди ограничен максимальным количеством клиентов в системе. Также учтено, что очереди пакетов, например, в IP-маршрутизаторах, где пакеты разного размера хранятся определенное время.

Предыдущее исследование было расширено в [45], где представлена модель диффузионного приближения, которая используется для исследования поведения приоритетных очередей. Диффузионное приближение позволяет включить в модели очередей достаточно общие допущения. Во-первых, это дает исследовательский инструмент для интуитивно простого рассмотрения переходных состояний очереди. Так можно исследовать потоки с общими промежуточными временными распределениями и серверов с общим распределением времени обслуживания. Отдельные модели серверов с общим распределением времени обслуживания. Здесь авторы используют формализм диффузионного приближения для исследования переходного и установившегося поведения

различных моделей. Модели могут использоваться для оценки эффективности механизмов качества обслуживания, например, в WiMAX, сетях класса Metro и пр.

В [46] авторы предложили модель для оценки функции плотности вероятности распределения времени перемещения пакета в многоинтервальной беспроводной сенсорной сети. Модель основана на диффузной аппроксимации, которая учитывает разнородность среды распространения и распределения узлов ретрансляции. Смоделированные параметры системы, например, вероятность потери пакетов или топология сети могут зависеть от времени.

Аппроксимированный аналитический метод для оценки вероятности потери пакета в синхронных оптических сетях с коммутацией пакетов, которые работают с ограниченным отклонением маршрутизации с помощью метода решения разногласий на основе приоритетов, представлен в [47]. Пакеты теряются, потому что получают слишком много отклонений и остаются в сети в течение всего собственного времени жизни. Авторы представили результаты для сети топологии двумерной сетки тора, которая работает в установившемся состоянии с равномерной загрузкой. Для сети, состоящей из 100 узлов, авторы оценили вероятность потерь пакетов приблизительно в  $10^{-9}$ , в то время, когда симулятор обеспечил результаты близко к  $10^{-6}$ . В случаях, когда было возможно, авторы верифицировали результаты моделирования.

Модель диффузионной аппроксимации, которая используется для исследования процесса заполнения очереди оптическими, электронными, а также нерегулярно поступающими пакетами, представлена в [48]. Использование диффузионной аппроксимации позволяет использовать общее распределение промежуточного времени и самоподобность процесса поступления, также, как и исследование переходных состояний. Авторы предложили новый диффузионный процесс с прыжками, который представляет полностью заполненную очередь из-за поступления пакета



большого размера, и предоставляют переходное решение для этого процесса. Модель позволяет изучить распределение промежуточного времени и распределение объема, который занимается оптическим пакетом.

Библиотека классов написанная на C++, позволяющая синтезировать модель сетей массового обслуживания, основанную на диффузионной аппроксимации представлена в [49]. Модель основана на открытой сети с произвольной топологией. Зависимые от времени и автокоррелированные поступающие потоки рассматриваются так же, как и зависимые от времени обслуживания. Программное обеспечение особенно хорошо подходит для анализа переходных состояний и для оценки разных алгоритмов управления, которые предотвращает заторы трафика в сетях связи.

Исследование диффузионной модели трафика показало, что она фокусируется на представлении трафика и его возмущений в виде системы массового обслуживания. Однако, данная модель остается громоздкой, что непосредственно влияет на качество работы программного обеспечения для построения сетей массового обслуживания, не является целиком разработанной для случаев, когда необходимым есть прогнозирование поведения трафика в реальном времени при условии стремительных изменений состояния компьютерной сети.

#### 1.4 Формализация требований к показателю эффективности функционирования транспортной сети оператора мобильной связи

Для формирования показателя эффективности работы транспортной сети, определим метрику  $\Omega$ , как совокупность значений параметров качества обслуживания и эффективности использования сетевых ресурсов, характеризующих ее элементы, как некоторые состояния  $(V_n)$ . При этом, процесс функционирования транспортной сети и любого из ее элементов происходит только в рамках  $V_n$ , определяемых максимально возможными

значениями таких показателей, как: величина пропускной способности ( $B_i$ ), величина задержек ( $D_i$ ) на определенных участках, утилизации каналов связи ( $Ut_i$ ), надежности ( $R_i$ ).

Для сравнения эффективности предсказателей можно использовать среднюю абсолютную процентную ошибку [50]. Этот показатель широко используется для оценки эффективности прогнозирования. Это отношение среднеквадратичной ошибки к дисперсии ряда и соотношение сигнал/шум (1.12).

$$MAPE = \frac{100\%}{L} \sum_{t=1}^L \left| \frac{X_t - \hat{X}_t}{X_t} \right|, \quad (1.12)$$

где  $X_t$  – фактическое значение временного ряда в момент времени  $t$ ;

$\hat{X}_t$  – прогнозируемое значение  $X_t$ ;

$L$  – интервал прогноза.

Если  $MAPE < 10\%$ , то прогноз сделан с высокой точностью. При  $10\% < MAPE < 20\%$ , прогноз считается хорошим, при  $20\% < MAPE < 50\%$  – удовлетворительным, а при  $MAPE > 50\%$  плохим.

Отношение сигнал/шум, для полученной прогнозной последовательности, можно оценить согласно (1.13):

$$SINR = 10 \lg \left( \frac{\sum_{t=1}^L X_t^2}{\sum_{t=1}^L (X_t - X)^2} \right). \quad (1.13)$$

Необходимое внимание стоит уделить оценке адекватности каждой пробной модели. Если модель адекватна, то ряд остатков должен быть похож на белый шум, т.е. их выборочные АКФ не должны отличаться от нуля.

Также для проверки гипотезы о том, что наблюдаемые данные являются реализацией «белого шума», используется Q-статистика. Q-статистика Льюинга-Бокса определяется согласно (1.14):

$$Q^* = n(n+2) \sum_{k=1}^m \frac{r_k^2}{n-k}, \quad (1.4)$$

где,  $n$  – объем выборки;

$m$  – максимальное количество лагов;

$r_k$  – коэффициенты АКФ.

Если в результате проверки несколько моделей оказываются адекватны исходным данным, то для окончательного выбора параметров прогностической модели стоит обратить внимание на такие факторы, как повышение точности и уменьшение числа параметров модели. Воедино эти требования сведены в информационные критерии Акайка и Шварца. В качестве примера, в данной работе представлен информационный критерий Шварца, в котором усилено требование уменьшения количества параметров модели, (1.15):

$$SBIK = \ln \left( \frac{\sum_{t=1}^n e_t^2}{n} \right) + \frac{(p+q)\ln(n)}{n}. \quad (1.15)$$

где  $p$  и  $q$  – параметры  $ARIMA(p, d, q)$  модели.

Несмотря на многочисленность, представленные наборы и классификация показателей эффективности функционирования транспортной сети мобильной связи, не дают адекватного описания процессов, функционирующих в ней. Это связано со следующими факторами:

- абсолютно все перечисленные параметры и их классы разнородны и имеют определенные, сложные в описании, функциональные зависимости. Например, вероятность потерь пакетов в пакетной сети зависит от величины предоставляемой пропускной способности канала. Чем больше, тем лучше. Но при этом стоимость такого канала увеличивается и также может увеличиться его утилизация. Для численной оценки необходим переход к безразмерным величинам;

- проблема выбора частных критериев для формирования комплексного. Составление комплексного показателя предполагает набор таких величин, использование которых полностью опишет функциональные возможности сети. Отсюда возникает вопрос об их качестве и количестве. Очевидно, что набор показателей может быть до десятка, но наиболее существенными могут быть только несколько;

- проблема соответствия параметров качества обслуживания и показателей эффективности функционирования сети с точки зрения оператора связи.

Основной, при этом, остается проблема согласования разнородных показателей (критериев) и степени их полезности для решаемой задачи. Существует вероятность, что, например, показатель по задержке будет оптимальным, и в то же время не будет оптимальным по пропускной способности и т.д. Избежать данной проблемы можно, если использовать зависимости полезности для конечного пользователя телекоммуникационных услуг от определенных параметров QoS. Например, пользователь не почувствует разницу при использовании IP-телефонии, если задержка будет 1 мс или 50 мс, но если задержка будет превышать порог в 150 мс или 400 мс, то это будет уже чувствительно. Или при предоставлении видео услуг доступная скорость передачи должна быть выше скорости формирования потока видеокодеком. Выделение излишней пропускной способности не будет влиять на восприятие качества услуги. Следовательно, для каждого из параметров QoS можно выделить зону не восприятия либо слабой

чувствительности пользователя к смене качества обслуживания. Для учета данных эффектов были введены так называемые функции «полезности»

Каждый тип трафика характеризуется своими требованиями к параметрам каналов связи. Если речевой трафик требователен к задержкам и их отклонениям, то передача данных – к искажениям и потерям пакетов. Поэтому для каждого типа передаваемых данных проведем анализ характеристик и требований к каналу связи. Для качественной оценки параметров передачи данных целесообразно ввести функции полезности подобные описанным в [51, 52]. Данные функции – это зависимость качественной нормированной оценки от определенного параметра канала связи. Другими словами, значения функции характеризуют приемлемость канала связи для передачи этого трафика в данный момент. Обычно, в соответствие с типами потоков назначают классы обслуживания. К классу с приоритетом 1 относят трафик речевой связи. К классу с приоритетом 2 – трафик видеоконференцсвязи. К классу с приоритетом 3 – трафик передачи файлов [53].

Относительность значений, представленных функции «полезности», позволяет переходить к безразмерным оценкам параметров качества обслуживания [54].

Также стоит обратить на следующую особенность оценки необходимой пропускной способности для разрабатываемого метода. Она заключается в сложности описания динамики поступающего трафика, а также с необходимостью нахождения решения задач, относящихся к различным уровням модели взаимодействия открытых систем. Экспериментальные исследования и анализ многочисленных измерений информационных потоков в современных телекоммуникационных сетях указывают на их специфическую природу. К факторам, порождающим такую специфику процессов, можно отнести:

- разнородность и разнотипность трафика [55]. Трафик имеет сложную структуру, т.к. является совокупностью множества потоков, каждый из которых, в свою очередь, имеет свои скоростные характеристики;
- поступающий трафик обладает большой пачечностью. Так, при сравнительно небольшом среднем значении интенсивности поступления пакетов присутствует определенное количество относительно больших выбросов. Данный фактор влияет на адекватность прогностических моделей сетевого трафика [56];
- характерным для описания процессов передачи данных пакетным трафиком являются обнаруженные на практике свойства самоподобия или масштабной инвариантности статистических характеристик. Данный фактор предполагает возможность прогнозирования процессов на определенном интервале [57, 58, 59], который чаще всего называют интервалом корреляции;
- стохастическая природа сетевого трафика и дискретная природа работы сетевых устройств его обслуживания, т.е. симбиоз непрерывных и дискретных процессов.

Математические модели, описанные системой нелинейных дифференциальных уравнений, на сегодняшний день находят свое широкое применение для описания разнообразных технических и природных процессов [60, 61]. В общем случае аналитическое решение таких задач невозможно. Кроме того, на сегодняшний день нет единой методики для построения решений систем нелинейных дифференциальных уравнений. Присутствие нелинейностей в этих системах существенно усложняет аналитические исследования, связанные с описанием, формированием и определением решений систем нелинейных дифференциальных уравнений. Следовательно, особый интерес вызывают те классы нелинейных систем дифференциальных уравнений, для которых предварительно созданы аналитические методы исследования. Рассмотрим нелинейные системы дифференциальных уравнений, у которых есть аналитические решения.

Методика построения решений основывается на применении асимптотических методов и математической теории Ateb-функций. С целью построения точных аналитических решений нелинейных систем дифференциальных уравнений академики Боголюбов М.М., и Митропольский Ю.А., применили метод усреднения, также известный как метод Боголюбова-Митропольского [62]. Розенберг Р.М., и Сенник П.М., использовали этот метод для построения точных решений определенного класса систем дифференциальных уравнений и ввели в рассмотрение Ateb-функции. Несмотря на то, что упомянутые авторы вывели математические формулы решений, исследовали свойства, но не разработали эффективные методы числового выражения для применения этих формул в практически важных задачах.

Ateb-функции, описанные Назаркевич М.А., в труде [63], дали возможность решить аналитические системы дифференциальных уравнений, описывающих существенно нелинейные процессы в системах с одной степенью свободы, (1.17)-(1.18)

$$\begin{cases} \dot{x} + \alpha_1 y^m = 0 \\ \dot{y} + \alpha_2 x^n = 0 \end{cases}, \quad (1.17)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – некоторые постоянные, а

$$n = \frac{2\theta'_1 + 1}{2\theta''_1 + 1}, \quad m = \frac{2\theta'_2 + 1}{2\theta''_2 + 1}, \quad (\theta'_1, \theta''_1, \theta'_2, \theta''_2 = 0, 1, 2, \dots). \quad (1.18)$$

Ateb-функции являются обращением Beta-функций. Неполная Beta-функция определяется равенством, (1.19)

$$B_x(p, q) = \int_0^x t^{p-1} (1-t)^{q-1} dt. \quad (1.19)$$

В частном порядке, при  $x=1$ , уравнение (1.19) примет вид интеграла Эйлера первого рода, (1.20)

$$B_1(p, q) = \int_0^1 t^{p-1} (1-t)^{q-1} dt, \quad (1.20)$$

т.е. полной Beta-функции.

Для всех  $x$ , интервала  $[0,1]$  функции  $B_x(p, q)$  и  $B_1(p, q)$  заданные формулами (1.19) и (1.20) являются дополнительными и удовлетворяют условиям  $0 \leq B_x(p, q) \leq B_1(p, q)$  и  $B_x(p, q) = B_1(p, q) - B_{1-x}(p, q)$ .

Принято рассматривать два варианта (1.21) и (1.22):

$$p = \frac{1}{n+1}, q = \frac{1}{m+1}; \quad (1.21)$$

$$p = \frac{1}{n+1}, q = \frac{m}{m+1} - \frac{1}{n+1}, \quad (1.22)$$

где  $m$  и  $n$  рассчитываются по (1.18).

При  $m=1$ ,  $n$ , оцененной по (1.18), то Назаркевич показала, что систему (1.17) можно свести к виду (1.23)

$$\ddot{x} + c|x| \cdot x^{\theta-1} = 0, \quad (1.23)$$

где  $\theta$  зависит от параметров  $\theta'_1, \theta''_1$  в (1.18).

Ateb-функции нашли свое применение и в разных сферах науки и инженерии [64]. В частности, Назаркевич М.А., исследует [65, 66] аналитические решения с помощью Ateb-функций для системы дифференциальных уравнений, описывающей колебательные движения с одной степенью свободы, для моделирования применяет преобразование и разложение Ateb-функций в ряды Фурье и Тейлора. Также был представлен



алгоритм и метод вычисления периодических Ateb-функций с помощью построения расписаний в ряды Фурье. Разработанный метод можно использовать с целью числового моделирования движения колеблющихся систем.

Основные модели в работе формализованы с помощью аппарата идемпотентных алгебр. Математический аппарат  $\text{Max}+$  алгебра является основой для имитационного моделирования систем, обладающих динамическими характеристиками. Существует целое направление исследований, посвященное вопросам применения идемпотентных алгебр вообще и  $\text{Max-plus}$  алгебра, в частности. Так, вопросам оптимального управления динамических систем посвящены работы представителей школы Маслова В.П.: Кривулина Н.К., Милова Д.С. др. [67, 68, 69, 70].

Идемпотентной полугруппой называется множество  $M$ , снабженное коммутативной и ассоциативной операцией  $\oplus$  (обобщённое сложение), обладающей нейтральным относительно этой операции элементом  $0$ :  $0 \oplus a = a$  для любого  $a \in M$  и удовлетворяющих условию идемпотентности  $a \oplus a = a$  для любого  $a \in M$ . Идемпотентная полугруппа называется идемпотентным полукольцом, если на ней определена еще одна ассоциативная операция  $\otimes$  (обобщенное умножение), обладающей нейтральным относительно этой операции элементом  $1$  и связанная с  $\oplus$  законом дистрибутивности слева и справа, (1.24), (1.25):

$$a \otimes (b \oplus c) = a \otimes b \oplus a \otimes c, \quad (1.24)$$

$$(b \oplus c) \otimes a = b \otimes a \oplus c \otimes a. \quad (1.25)$$

Множество вещественных чисел  $\underline{\mathbf{R}}$ , расширенное путем добавления элемента  $\varepsilon = -\infty$ , с заданными на нем  $\oplus$  и  $\otimes$ , которые для любых  $x, y \in \underline{\mathbf{R}}$  определяются следующим образом, (1.26) - (1.28):

$$x \oplus y = \max(x, y), \quad (1.26)$$

$$x \otimes y = x + y, \quad (1.27)$$

причем

$$x \otimes \varepsilon = \varepsilon. \quad (1.28)$$

Для матриц также существует идемпотентное полукольцо: для любых двух матриц  $\mathbf{A} = (a_{ij})$  и  $\mathbf{B} = (b_{ij})$  размера  $l \times n$  и  $n \times t$  для операции  $\otimes$ , выполнение рассматриваемых операций осуществляется по формуле, (1.29), (1.30):

$$\{\mathbf{A} \oplus \mathbf{B}\}_{ij} = a_{ij} \oplus b_{ij}, \quad (1.29)$$

$$\{\mathbf{A} \otimes \mathbf{B}\}_{ij} = \bigoplus_{k=1}^n a_{ik} \otimes b_{kj} \quad (1.30)$$

Определены операции умножения матрицы на скаляр и сложение матрицы и скаляра. Так, для любого  $\lambda \in \underline{\mathbf{R}}$  и матрицы  $\mathbf{A} = (a_{ij})$  размера  $l \times n$ , (1.31)-(1.32):

$$\{\lambda \oplus \mathbf{A}\}_{ij} = \lambda \oplus a_{ij}, \quad (1.31)$$

$$\{\lambda \otimes \mathbf{A}\}_{ij} = \lambda \otimes a_{ij}. \quad (1.32)$$

Матрица  $\varepsilon$ , все элементы которой равны  $\varepsilon$ , называется нулевой матрицей. Матрица  $\mathbf{I}$ , с элементами равными  $e$  на главной диагонали и  $\varepsilon$ , вне ее, представляет собой нейтральную матрицу.

Возведение матрицы  $\mathbf{A} \in \underline{\mathbf{R}}$  в степень  $n > 0$  можно определить следующим образом, (1.33):

$$\mathbf{A}^n = \mathbf{A} \otimes \dots \otimes \mathbf{A} = \bigotimes_{i=1}^n \mathbf{A}. \quad (1.33)$$

Особый интерес представляет собой операция  $\mathbf{A}^*$ , которая используется для нахождения решения уравнений пространства состояний в базисе Max-plus алгебры. Если матрица  $\mathbf{A}$  составлена для графа, с  $n$  вершинами, тогда операция  $\mathbf{A}^*$  определена исходя из (1.34):

$$\mathbf{A}^* = \mathbf{A} \oplus \mathbf{A}^2 \oplus \dots \oplus \mathbf{A}^{n-1}. \quad (1.34)$$

Кроме перечисленных свойств, аппарат идемпотентных алгебр широко используется в приложениях для решения оптимизационных задач, формализации, переходе и нахождению решений уравнений пространства состояний, для принятия решений об управляемости процесса.

Итак, при разработке прогнозной модели оценки пропускной способности поступающего трафика вышеперечисленное может быть учтено с использованием аппаратов теории дискретно-событийных систем [71, 72], теории дискретно-непрерывных систем [73] и идемпотентных алгебр [74]. Также для облегчения наглядного представления развития процесса во времени также могут использоваться сети Петри [75, 76].

Условия иерархичности достаточно полно представляются в терминах теории графов и теории дискретно-событийных систем.

## 1.5 Цель и задачи исследования

Транспортная сеть мобильного оператора связи является сложной технической системой, целью которой является передача информации от контроллера базовой станции к магистральной сети и обратно с определенным уровнем качества обслуживания. Это приводит к тому, что транспортная сеть мобильного оператора связи становится «узким местом».

Одним из способов решения данной проблемы является использование различных технологий передачи данных: от оптики до организации микроволновой передачи. Другим – перераспределение имеющихся ресурсов транспортной сети. Для того, чтобы принять решение о необходимости распределения ресурсов, оператору связи необходимо руководствоваться некими оценками качества ее работы.

Особенность оценки необходимой пропускной способности заключается в сложности описания динамики поступающего трафика, а также необходимости нахождения решения задач, относящихся к различным уровням модели взаимодействия открытых систем. Экспериментальные исследования и анализ многочисленных измерений информационных потоков в современных телекоммуникационных сетях указывают на их специфическую природу.

Последние зависят от множества факторов: от выполнения требований по обеспечению параметров качества обслуживания для абонента до изменения оценки утилизации каналов. В этом случае возникают две научно-исследовательские задачи. Первая – выбор и постановка требований к соответствующим оценкам качества работы сети. При этом, разнородность и различный вес последних, при формировании общей картины, делает эту задачу достаточно нетривиальной. Вторая – возможность прогнозирования вышеперечисленных оценок, в зависимости от количества абонентов и типа формируемого ими трафика.

В результате анализа установлено, что использование единой модели прогнозирования для всех оценок приводит к ухудшению их точности. Это явление основано на функциональной зависимости оценок с одной стороны (чем больше выделяется пропускной способности, тем меньше вероятность потерь и тем выше утилизация канала) и характером прогнозируемых оценок с другой. Так, динамические характеристики поступающего трафика наиболее адекватно можно описать с использованием аппаратов теории дискретно-событийных систем, теории дискретно-непрерывных систем,

идемпотентных алгебр и сетей Петри. Достаточно высокий результат, благодаря возможности обучения, показывает аппарат искусственных нейронных сетей.

Для исключения влияния разнородности используемых оценок качества предложено перейти к безразмерным функциям, называемыми функциями «полезности». Это позволит перейти к безразмерным оценкам для формирования комплексного критерия оценки качества работы транспортной сети. Он используется для обоснования метода прогнозирования и, в целом, повышения эффективности использования сетевых ресурсов транспортной сети мобильного оператора связи.

Все перечисленное выше сводится к постановке общей задачи исследований: усовершенствование моделей и методов прогнозирования в условиях реализации методов оценки параметров QoS путем разработки соответствующих математических моделей для повышения эффективности использования сетевых ресурсов в целом. Решение общей задачи можно разделить на следующие подзадачи:

- анализ состояния решения проблемных вопросов в области прогнозирования оценки качества работы транспортной сети оператора мобильной связи, обоснование актуальности темы и цели исследования;
- анализ и разработка прогностических и математических моделей метода прогнозирования;
- обоснование метода прогнозирования оценок качества работы транспортной сети;
- оценка эффективности разработанного метода путем имитационного моделирования и выработка рекомендаций по их практическому использованию.

Решению вышеперечисленных подзадач посвящены следующие разделы настоящей научно-исследовательской работы.

## РАЗДЕЛ 2

# АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА ПРОГНОСТИЧЕСКИХ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Данный раздел исследования посвящен анализу и разработке основных моделей, используемых для обоснования метода прогнозирования.

## 2.1 Анализ классического подхода к определению оценок качества работы транспортной сети

Процесс обслуживания поступающей нагрузки в транспортную сеть можно описать моделью СМО с входящим самоподобным потоком и детерминированным временем обслуживания  $f_{BM} / D / 1$ . Определение характеристик, согласно данной системы, рассматривалось в [77], где основные расчеты проводились по формуле Норроса. С помощью методик [78, 79], получена следующая формула для нахождения зприближенного значения задержки пакета, (2.1):

$$D = \frac{1}{\lambda} \left[ y - \left( \frac{1}{b} + \frac{y}{b} \cdot \frac{(y+b)^{\frac{2H-1}{2(1-H)}}}{(b-y)^{\frac{H}{1-H}}} \right) \right], \quad (2.1)$$

где  $D$  – оценка времени задержки пакета, складывающаяся из времени нахождения пакета в очереди и времени передачи пакета по каналу связи;

$\lambda$  – параметр поступающего потока в пак/с;

$y$  – поступающая нагрузка в бит/с;

$b$  – пропускная способность канала бит/с;

$H$  – параметр Херста, характеризующий степень самоподобия.

Вероятность потерь пакетов можно оценить по следующим формулам, (2.2)-(2.3):

$$P = \frac{(1-\rho)}{1-\rho^{(x+1)2(1-H)}} \cdot \rho^{x^{2(1-H)}}, \quad (2.2)$$

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}, \quad (2.3)$$

где  $P$  – вероятность потерь пакетов;

$\mu$  – интенсивность обслуживания канала передачи в пак/с;

$H$  – параметр Херста, характеризующий степень самоподобия;

$x$  – необходимый объем выходного буфера, требуемый для обслуживания поступающей нагрузки;

$\alpha$  – коэффициент разногласий в канале связи;

$\rho$  – отношение интенсивности нагрузки к пропускной способности канала.

Таким образом, исходя из параметра входящего информационного потока, мы можем выбрать такую пропускную способность канала, при которой рассчитанный размер буфера будет обеспечивать требуемые задержки и величину потерь пакетов в канале связи, (2.2)-(2.3). Причем величина потерь пакетов при заданном размере буфера будет стремиться к нулю, для обеспечения лучшего качества обслуживания.

Суммарная требуемая пропускная способность и размер буфера определяются соответственно, (2.4)-(2.5):

$$B = \sum_{i=1}^N b_i, \quad (2.4)$$

$$X = \sum_{i=1}^N x_i, \quad (2.5)$$

где  $B$  – искомая пропускная способность канала транспортной сети;

$b_i$  – необходимая пропускная способность для обслуживания  $i$ -го потока;  
 $X$  – искомый размер выходного буфера магистрального канала;  
 $x_i$  – необходимый размер буфера для обслуживания  $i$ -го потока.

Некоторые технологии, например, MPLS-TP, а так же применяемые методы QoS, позволяют каждому типу трафика выделять требуемую, из общего объема, пропускную способность магистрали и требуемый размер буфера для гарантированного качества обслуживания, т.е. гарантированной задержки в моменты перегрузок на сети, которые могут случаться в короткие промежутки времени в период ЧНН.

Необходимо учитывать тот факт, что реальный параметр информационных потоков, будет отличаться, так как передача пакетов ведется с помощью нескольких протоколов, каждый из которых вносит добавочную служебную информацию (заголовок) к пользовательским данным, что увеличивает объем передаваемой информации и соответственно интенсивность нагрузки потока данных.

Параметр информационного потока услуги Интернет можно оценить, исходя из (2.6):

$$\lambda_{DATA} = \frac{y_{DATA}}{n}, \quad (2.6)$$

где  $y_{DATA}$  – интенсивность нагрузки;

$n$  – длина пакета.

Для оценки показателей параметров качества обслуживания примем следующие допущения. Длину пакета примем максимально возможную для технологии Gigabit Ethernet – 1500 байт, так как такие пакеты имеют наибольшие задержки при передаче. Учитывая, что поступающий поток – самоподобный, то уже при  $\rho = 0,6$ , происходит резкое возрастание величин задержек пакетов.



Так как расчет пропускной способности производился для пакетов без учета заголовков Ethernet и MPLS-IP, необходимо включить служебные данные в расчет, (2.7)

$$b_1 = b_{расч} + (\mu_{расч} \cdot (preamble + fr\_del + ETH_{hdr} + IFG + MPLS\_TP_{hdr}) \cdot 10^{-6}), \quad (2.7)$$

где  $b_{расч}$  – рассчитанная пропускная способность Мбит/с;

$\mu_{расч}$  – рассчитанная интенсивность обслуживания пак/с;

$preamble$  – преамбула кадра Ethernet, 7 байт;

$fr\_del$  – разделитель кадров, 1 байт,

$ETH_{hdr}$  – заголовок кадра Ethernet, 18 байт;

$IFG$  – межкадровый интервал, 12 байт;

$MPLS\_TP_{hdr}$  – две метки MPLS-TP по 4 байта.

Исходя из вышеперечисленного, минимально необходимая пропускная способность составляет 1172,98 Мбит/с, с долей служебных данных 2,98 %. Минимальный объем буфера составляет 405 пакетов.

Параметры интенсивности VoIP и H.248 потока, исходя из интенсивностей речевого и сигнального трафиков, определяются как, (2.8)-(2.10):

$$\lambda_{VoIP} = Y_{VoIP} \cdot \frac{10^3}{N_{VoIP} \cdot 8}, \quad (2.8)$$

$$\lambda_{H.248} = Y_{H.248} \cdot \frac{10^3}{N_{H.248} \cdot 8}, \quad (2.9)$$

$$\lambda = \lambda_{VoIP} + \lambda_{H.248}, \quad (2.10)$$

где  $Y_{VoIP}$ ,  $Y_{H.248}$  – интенсивности нагрузок речевого и сигнального трафиков соответственно;

$N_{VoIP}$  – средняя длина речевого пакета, 160 байт;

$N_{H.248}$  – средняя длина сообщения H.248, 200 байт.

Кодек G.711 со средней длительностью пакета 20 мс и размером пакета 160 байт допускает задержку пакета до 150 мс. Согласно анализу, необходимое значение пропускной способности – 47724 Кбит/с, а требуемая пропускная способность с учетом транспортных и канальных заголовков составляет 47725,46 Кб/с, причем необходимо использовать буфер размером не менее 555 пакетов.

Определим параметр IPTV потока по формуле, (2.11):

$$\lambda_{IPTV} = Y_{IPTV} \cdot \frac{10^6}{n}, \quad (2.11)$$

где  $Y_{IPTV}$  – интенсивность нагрузки потока IPTV;

$n$  –длина пакета.

Формат видеовещания MPEG2 и MPEG4 предполагает размещение видеокадров в канальных кадрах максимального размера, что для технологии GE составляет 1500 байт и 12000 бит соответственно. Для обеспечения требуемых параметров QoS, нужно сформировать канал с пропускной способностью не менее 204,924 Мбит/с. С учетом транспортных и канальных заголовков, требуемая пропускная способность составит 211,2083 Мбит/с, а минимальный объем буфера при этом составит 405 пакетов.

На основе полученных данных для трех услуг определим требуемую пропускную способность канала связи транспортной сети мобильного оператора связи и минимальный объем буфера для создаваемого потока.

$$B = 1172,98 + 47,72 + 211,21 = 1431,954 \text{ Мбит/с,}$$

$$X = 405 + 555 + 405 = 1365 \text{ пакетов.}$$

Классическая модель определения оценок качества работы

транспортной сети [80] предполагает сбор и статистическую обработку данных о поступающей нагрузке за определенный момент времени – час, неделя, месяц. Это недопустимо, т.к. современные сети передачи данных обслуживают постоянно изменяющуюся нагрузку и любая сеть передачи данных, а тем более транспортная вынуждена «реагировать» на нее.

С другой стороны, при неправильной реакции на поступающую нагрузку, работа сети теряет свою эффективность, что противоречит цели данного диссертационного исследования. Таким образом, использование классической модели не приемлемо.

## 2.2 Разработка прогностических моделей оценки объема выделяемой пропускной способности для подключаемого абонента

В качестве тестового набора для определения свойств поступающего трафика выбран двухмесячный трафик НТТР-запросов к одному из Интернет-серверов [81]. Среднее количество запросов к серверу составляет около 100 запросов в минуту – это не являлось достаточной нагрузкой на базовую станцию, поэтому принято решение об объединении трафика однотипных дней недели каждого месяца в единый поток длительностью в две недели. Т.о. получилось четырехкратное повышение нагрузки с сохранением основных характеристик трафика. Полученный трафик представлен на рисунке 2.1.

Трафик первой недели будет использоваться в качестве обучающей последовательности, а трафик второй недели – для оценки эффективности разрабатываемого алгоритма.

Оценим характеристики поступающего трафика. Среднее значение за  $j$ -й интервал определим согласно (2.12):

$$\lambda_j(i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \lambda_k, \quad (2.12)$$

где  $\lambda_k$  – значения интенсивности поступающего трафика.

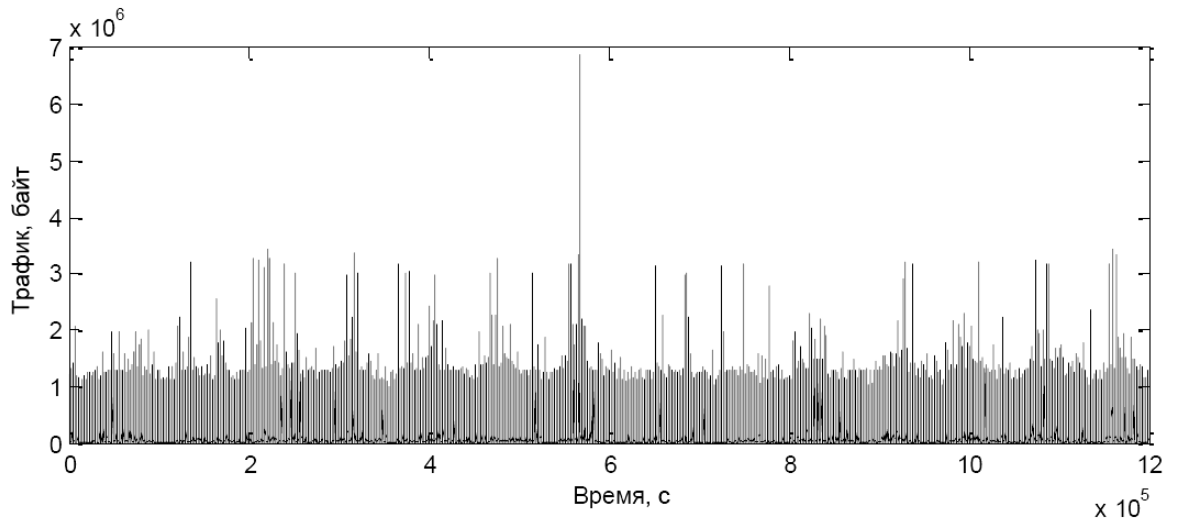


Рисунок 2.1 – Сформированный недельный тестовый трафик

На рисунке 2.2 представлен трафик, усредненный на интервале 1 минута.

На основе представленного графика, можно увидеть, что поступающий трафик характеризуется выраженной суточной и недельной цикличностью.

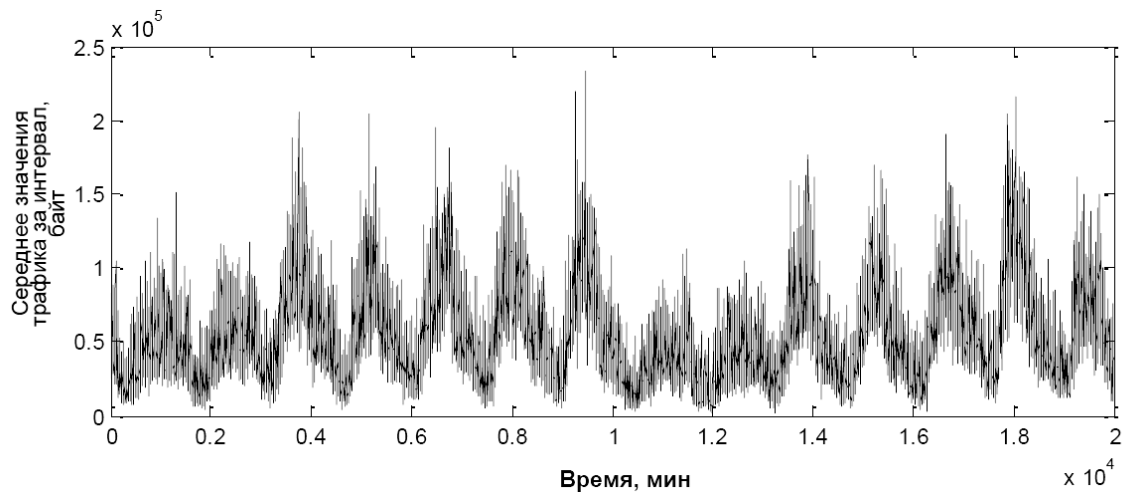


Рисунок 2.2 – Трафик, усредненный на интервале, длительностью в 1 минуту

После оценки изменения среднего квадратичного отклонения трафика во времени можно сделать вывод, что трафик – нестационарный.

Среднеквадратичное отклонение за  $j$ -й интервал можно оценить, исходя из (2.13):

$$\sigma_{\lambda_j(i)} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (\lambda_k - \lambda_j(i))}. \quad (2.13)$$

На рисунке 2.3 приведен график изменения среднего квадратичного отклонения трафика во времени. Для определения уровня стационарности в работе проводится соответствующий анализ.

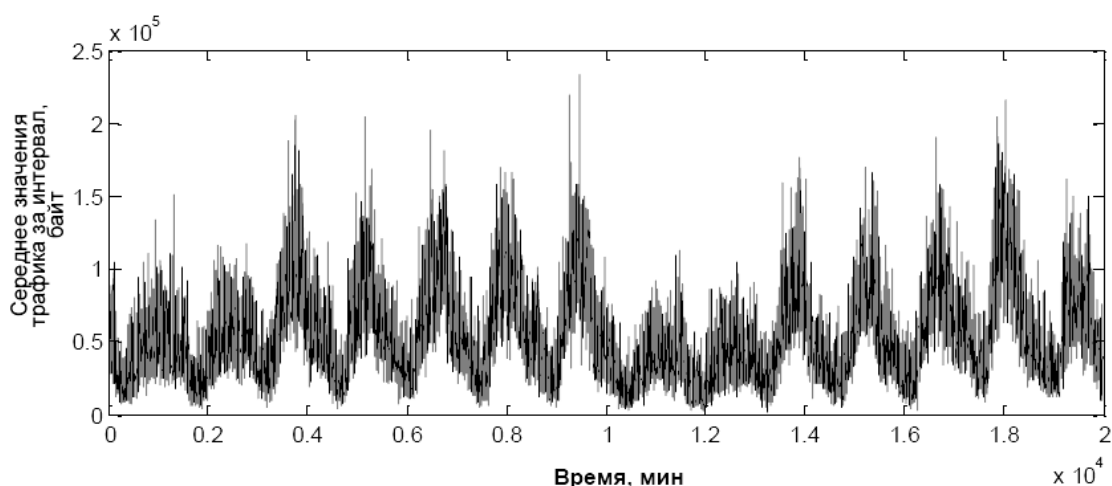


Рисунок 2.3 – График изменения среднего квадратичного отклонения трафика во времени

Как было упомянуто в пп. 1.3.4 в качестве модели самоподобного трафика в данной исследовательской работе используется прогностическая ARFIMA модель. Основными величинами, для задания параметров модели, в данном случае является горизонт прогноза ( $\Delta t_{pred}$ ) и коэффициент Херста ( $H$ ). В общем случае, горизонт прогноза напрямую связан с интервалом корреляции ( $\tau_k$ ):

$$\tau_k = \int_0^{\infty} |r(\tau)| d\tau, \quad (2.14)$$

где  $r(\tau)$  – нормированная функция корреляции случайного процесса.

АКФ тестового трафика рассчитывается, согласно (2.14) и изображена на рисунке 2.4.

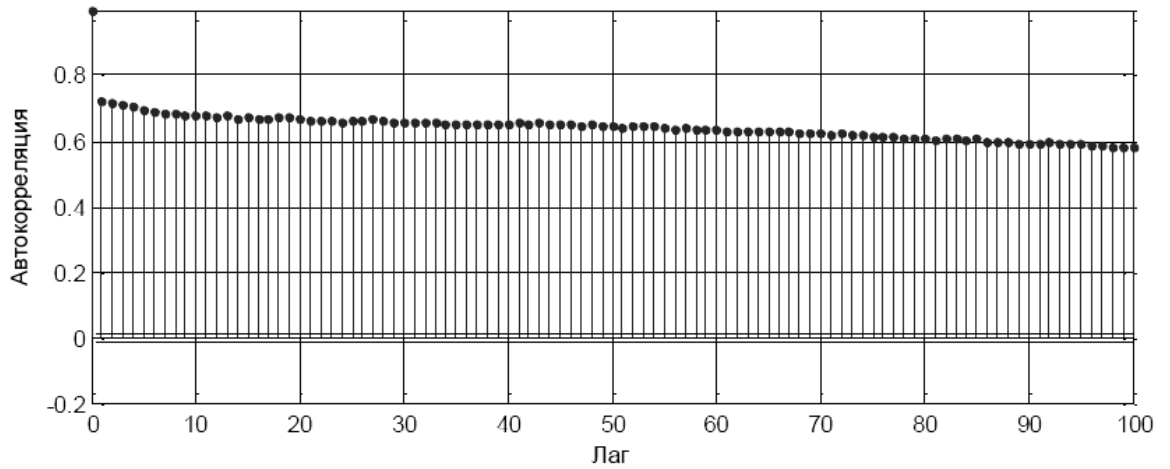


Рисунок 2.4 – АКФ тестового трафика

Как можно увидеть, у трафика явно выраженная зависимость от предыдущих отсчетов времени.

Исходя из определения самоподобного процесса

$$r(\tau) \sim \tau^{-\beta}, \tau \rightarrow \infty, 0 < \beta < 1, \quad (2.15)$$

$$\tau_k = \int_0^{\infty} \tau^{-\beta} d\tau, \quad (2.16)$$

где  $\beta$  – параметр затухания, связанный с показателем Херста соотношением

$$H = 1 - \beta/2.$$

Решение выражения (2.13) приводит к теоретически бесконечно протяженному интервалу корреляции, т.е. возможности прогнозирования самоподобных процессов. Следовательно, решение данной задачи возможно при наложении дополнительных ограничений для определения интервала прогноза.

Параметр Херста, определенный, исходя из полученных зависимостей составляет  $H = 0,85$ . Таким образом, можно сделать вывод, что рассматриваемый трафик являет собой нестационарный процесс с выраженной цикличностью, долгосрочными зависимостями и высокой самоподобностью. Т.е., возможно прогнозирование.

### 2.2.1 Математическая модель трафика на основе нелинейных дифференциальных уравнений для периодических процессов

Рассмотрим вид математической модели трафика в виде нелинейной колеблющейся системы с одной ступенью свободы и малым возмущением. Моделирование трафика сегмента сети передачи данных  $x(t)$  осуществляется с помощью обычного дифференциального уравнения с малым параметром  $\varepsilon$ ,

(2.17)

$$\ddot{x} + \alpha^2 x^n = \varepsilon f(x, \dot{x}, t), \quad (2.17)$$

где  $x(t)$  – количество пакетов в сети в момент времени  $t$ ;

$\alpha$  – константа для определения периода колебаний значений трафика;

$f(x, \dot{x}, t)$  – любая аналитическая функция, используемая для описания и моделирования незначительных отклонений значений трафика от основной составной колебаний;

$n$  – число, определяющее степень нелинейности уравнения и оказывает влияние на период основной составляющей колебаний

При выполнении следующий условий для  $\alpha$  и  $n$ , (2.18):

$$\alpha \neq 0, \quad n = \frac{2k_1 + 1}{2k_2 + 1}, \quad \text{при } k_1, k_2 = 0, 1, 2, \dots \quad (2.18)$$

Доказано, что аналитическое решение уравнения (2.18) представляется в виде Атеб-функций. Для решения задач прогнозирования трафика в компьютерной или телекоммуникационных сетях важным является выбор типа функции  $f(x, \dot{x}, t)$ , потому что именно тут учитываются особенности выбранной сети. Способ, в котором рассмотрены небольшие возмущения, такие как периодические функции, может использоваться для моделирования сети с нерезкой сменой интенсивности трафика. Однако, здесь рассмотрены возмущения в виде суммы функций Дирака. Это описание лучше отвечает компьютерной сети с явными пульсациями интенсивности трафика. Рассмотрим функцию  $f$  вида, (2.19)

$$f(x, \dot{x}, t) = \sum_{i=1}^N a_i \delta_i(t_i), \quad (2.19)$$

где  $N$  – количество возмущений на интервале  $[0, T]$ ;

$a_i$  – амплитуда возмущения  $-A \leq a_i \leq A$ ,

$A$  – максимальная амплитуда возмущений (сгенерированная случайным числом);

$\delta_i$  – дельта-функция;

$t_i$  – момент времени, в котором определяется  $i$ -е возмущение, генерируемой случайным образом.

Для решения уравнения (2.19) воспользуемся выражением без функции возмущения, (2.20):

$$\ddot{x} + \alpha^2 x^n = 0. \quad (2.20)$$

Записав дифференциальное уравнения второго порядка (2.20) в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка, а также осуществив замену переменных  $y = \dot{x}$ , дифференциальное уравнение второго порядка



(2.20) можно переписать как следующую систему дифференциальных уравнений первого порядка, (2.21)

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} - y = 0 \\ \frac{dy}{dt} + \alpha^2 x^n = 0 \end{cases}, \quad (2.21)$$

а решение (2.21) представляется через периодические Ateb-функции, как (2.22)

$$\begin{cases} x = aCa(n, 1, \varphi) \\ y = a^{\frac{1+n}{2}} hSa(n, 1, \varphi) \end{cases}, \quad (2.22)$$

где  $h^2 = \frac{2a^2}{1+n}$ ,  $a$  – амплитуда колебаний,

$Ca(n, 1, \varphi)$  – Ateb-косинус;

$Sa(n, 1, \varphi)$  – Ateb-синус.

Переменная  $\varphi$  связана со временем  $t$  соотношением вида, (2.23):

$$\varphi = \frac{a^{\frac{n-1}{2}}}{L} t + \varphi_0, \quad (2.23)$$

где  $L$  – некоторая константа;

$\varphi_0$  – начальная фаза колебаний, которые определяются из начальных условий для уравнения (2.24)

Периодические условия представлены выражениями, (2.24)

$$\begin{cases} Ca(n,1,\varphi + 2\Pi) = Ca(n,1,\varphi) \\ Sa(n,1,\varphi + 2\Pi) = Sa(1,n,\varphi) \end{cases}, \quad (2.24)$$

где  $\Pi$  – полупериод Ateb-функции.

Если выражения (2.22) и (2.23) подставить в (2.24) и взять во внимание условия (2.23), то получим следующее соотношение для вычисления константы  $L$  в (2.25), (2.26):

$$L = \frac{2B\left(0,5, \frac{1}{1+n}\right)}{\Pi(1+n)h}. \quad (2.25)$$

В (2.25) выражение  $B(x, y)$  - полная Beta-функция с аргументами  $x = 0,5$ ;  $y = \frac{1}{1+n}$ . Подставляя в (2.24) выражение  $Ca(n,1,\varphi)^{m+1} + Sa(1,n,\varphi)^2 = 1$ , получим результирующую формулу для вычисления Ateb-функции, (2.26)

$$\Pi(n,1) = B\left(0,5, \frac{1}{1+n}\right). \quad (2.26)$$

Рассмотрим начальные условия для системы уравнений (2.21). Так, для выражения (2.17) начальные условия, (2.27):

$$x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = const, \quad (2.27)$$

допуская, что  $n = \frac{1}{2k+1}$  и  $k \rightarrow \infty$ . Такие начальные условия не могут использоваться для имитационного моделирования трафика. Выдвинем предположения, что значение трафика и изменения значений трафика

постоянно определенными в момент времени  $t=0$ . Соответственно этим допущениям, определим начальные значения, как, (2.28):

$$x(0) = c_1, \dot{x}(0) = c_2, \quad (2.28)$$

где  $c_1$  определяет начальный трафик и  $c_1 \neq 0$ ,  $c_2$  определяет изменения начального трафика и может быть равным нулю в начальный момент времени  $t=0$ .

Принимая во внимание, что  $Ca(n,1,0)=1$  и  $Sa(1,n,0)=0$ , уравнение (2.24), исходя из начальных условий (2.28), получаем  $c_1 = a$  и  $c_2 = 0$

Для решения (2.17) уравнения используем асимптотический метод на основе (2.24). Согласно этому методу, существует решение в виде ряда с малым параметром  $\varepsilon$ , (2.29):

$$x(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \varepsilon^i x_i(t). \quad (2.29)$$

Для проведения численного моделирования, необходимо отбросить члены, в которых есть  $\varepsilon$ , на порядок больше  $M$ . Т.е., решение получено с точностью порядка с точностью  $\varepsilon^{M+1}$ . На следующем шаге найдем решение в виде рядов с параметром порядка  $\varepsilon$ , следующим образом, (2.30)

$$x(t) = \sum_{i=1}^M \varepsilon^i x_i(t), \quad (2.30)$$

Подставив ряд (2.30) в левую часть (2.17) превращается в систему дифференциальных уравнений с переменными, (2.31)

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} - y = 0 \\ \frac{dy}{dt} + \alpha^2 x^n = \varepsilon f(t, x, y) \end{cases}. \quad (2.31)$$

В пункте представлена теория нелинейных дифференциальных уравнений колеблющегося движения для моделирования периодических процессов и поведения этих систем. Осуществлено описание динамических процессов исследуемых нелинейных систем, описываемых с помощью Атеб-функций.

### 2.2.2 Анализ аналитической модели прогнозирования оценок объема выделяемой пропускной способности

В качестве базовой модели для исследований взята модель, реализующая простой метод экспоненциального сглаживания, реализованный в аналитической модели прогнозирования (рисунок 2.5).

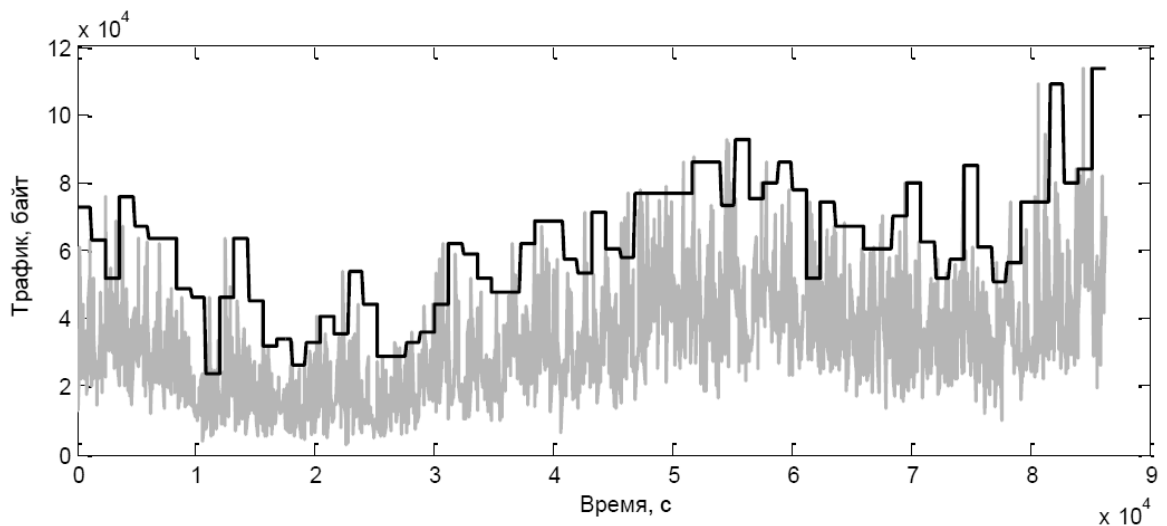


Рисунок 2.5 – Формирование оценок пропускной способности для тестового трафика согласно аналитической модели прогнозирования

Для аналитической модели прогнозирования оценок объема выделяемой пропускной способности, определены следующие основные параметры:

- текущая оценка величины пропускной способности ( $b_j(\Delta\tau)$ ) для прогнозирования оценки объема выделяемой пропускной способности;
- частота сбора статистических данных, далее размер интервала статистики ( $\Delta t$ );
- время, необходимое для перераспределения системой сетевых ресурсов ( $\Delta\tau$ ), далее размер интервала перераспределения.

Алгоритм прогнозирования решает следующую задачу: для некоторого потока трафика  $tr_j(i)$ , где  $j$  – сервис, а  $i$  – последовательность временных отсчетов, в которые производилась оценка трафика, необходимо оценить объем выделяемой пропускной способности ( $b_j(\Delta\tau)$ ), который в течение времени ( $\Delta\tau$ ) будет удовлетворять подключаемого абонента с обеспечением заданных параметров качества обслуживания.

Последовательность  $c_j(i\Delta t)$  формируется путем мониторинга поступающего трафика и обрабатывается согласно (2.32):

$$c_j(i\Delta t) = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n \lambda_j((i(n-1) + l)\Delta t), \quad (2.32)$$

где  $\lambda_j(i)$  – оценка интенсивности  $j$ -го потока трафика на  $i$ -м статистическом интервале;

$n$  – число измерений трафика за статистический интервал  $\Delta t$ .

Значение оценки объема выделяемой пропускной способности определено как максимальное значение из оценок интенсивностей в пределах интервала перераспределения, (2.33):

$$b_j(m\Delta\tau) = \max_{i=1..k}(c_j(m(k-1)+i)\Delta t), \quad (2.33)$$

где  $k$  – число статистических интервалов в одном интервале перераспределения;

$m$  – номер интервала перераспределения.

Полученное значение является оценкой объема выделяемой пропускной способности для  $j$ -го потока трафика на следующий интервал перераспределения, при выполнении следующих условий, (2.34)-(2.36):

$$b_j(m\Delta\tau), \quad b_j(m\Delta\tau) > b_j((m-1)\Delta\tau) + \text{delta}, \quad (2.34)$$

$$b_j((m-1)\Delta\tau), \quad b_j(m\Delta\tau) \leq b_j((m-1)\Delta\tau) - \text{delta}, \quad (2.35)$$

$$Pl \leq Pl_{QoS}, \quad MAPE < 0,5, \quad (2.36)$$

где  $\text{delta}$  – порог регулирования;

$Pl$  – доля потерь трафика исследуемой математической модели;

$Pl_{QoS}$  – требования к качеству обслуживания для поступающего трафика;

$MAPE$  – средняя абсолютная процентная ошибка прогнозирования.

При этом должно выполняться условие отсутствия перегрузок в физическом канале, (2.37):

$$\sum_{j=1}^N b_j(m\Delta\tau) < C, \quad (2.37)$$

где  $C$  – пропускная способность физического канала;

$N$  – количество каналов с заданной пропускной способностью, в одном физическом.

Значения  $b_j(m\Delta\tau)$  рассчитываются для всех каналов с заданной пропускной способностью, принадлежащих одному логическому каналу. Для наглядности результатов расчета, согласно разным моделям, пусть число таких каналов в физическом, составляет один. Выражение (2.37) учитывает требования к качеству обслуживания, которые можно оценить согласно:

$$Pl = \frac{1}{M} \sum_{l=1}^M P_j((n-l)\Delta\tau), \quad (2.38)$$

где  $M$  – количество интервалов перераспределения в реализации поступающего трафика;

$P_j(\Delta\tau)$  – доля потерь трафика за интервал перераспределения.

Расчетная формула средней абсолютной процентной ошибки прогнозирования видоизменена, исходя из логики математической модели, (2.39):

$$MAPE = \frac{1}{M} \sum_{l=1}^M ErP_j((n-l)\Delta\tau), \quad (2.39)$$

где  $ErP_j(\Delta\tau)$  – оценка абсолютной процентной ошибки прогнозирования объема выделяемой пропускной способности в рамках интервала перераспределения.

В зависимости от того, будет ли интенсивность поступающего трафика больше или меньше, чем рассчитанная оценка, вычисляется доля потерь трафика и оценка абсолютной процентной ошибки прогнозирования объема выделяемой пропускной способности в рамках интервала перераспределения, (2.40) и (2.41):

Для  $\lambda_j(\Delta\tau) < b_j(\Delta\tau)$

$$P_j(\Delta\tau) = 0, \quad ErP_j(\Delta\tau) = \frac{\int_0^{\Delta\tau} b_j(\Delta\tau) d\Delta\tau - \int_0^{\Delta\tau} \lambda_j(\Delta\tau) d\Delta\tau}{\int_0^{\Delta\tau} b_j(\Delta\tau) d\Delta\tau} \quad (2.40)$$

для  $\lambda_j(\Delta\tau) > b_j(\Delta\tau)$

$$ErP_j(\Delta\tau) = 1, \quad ErP_j(\Delta\tau) = \frac{\int_0^{\Delta\tau} \lambda_j(\Delta t) d\Delta t - \int_0^{\Delta\tau} b_j(\Delta t) d\Delta t}{\int_0^{\Delta\tau} \lambda_j(\Delta t) d\Delta t}. \quad (2.41)$$

Для величин интервалов статистики и перераспределения, равным 5 минутам и нескольким часам, соответственно, данные значения необходимо уточнять. Это связано с высокой скоростью изменения трафика. Для этого проведены исследования зависимостей показателей качества обслуживания поступающего трафика от величин интервалов статистики и перерегулирования. Приемлемое значение величин интервалов статистики и перераспределения можно определить, исходя из условий обеспечения требуемых параметров качества обслуживания (2.38) и (2.39).

К основным недостаткам аналитической модели относятся несовершенство оценки прогнозируемого объема выделяемой пропускной способности и медленная скорость адаптации к интенсивности поступающего трафика. Каждый из вышеперечисленных недостатков вносит свою долю погрешности в прогноз оценки объема выделяемой пропускной способности. Все это приводит к основному недостатку аналитической модели – высокому объему используемого канального ресурса. Ослабление либо устранение приведенных недостатков возможно путем модифицирования исходной модели. Рассмотрим такие модификации далее.



### 2.2.3 Анализ прогностической модели на основе ИНС

Как отмечено в начале данного подраздела, трафик является нестационарным. Чтобы определить стационарность трафика в середине интервала на разных уровнях агрегации, используем следующий алгоритм. Для каждого уровня агрегации входного временного ряда, начиная с одной минутой и заканчивая одним часом с шагом в одну минуту, разобьём временной ряд на интервалы величиной, равной уровню агрегации. Для каждого интервала выполняется тест Квятковского-Филипса-Шмидта-Шина (КФШШ) с заданным уровнем значности.

Нулевой гипотезой теста КФШШ является стационарность временного ряда возле линейного тренда или среднего значения [82]. Альтернативная гипотеза – временной ряд не является стационарным.

В модели КФШШ ряд наблюдений представлен как сумма трех компонент: детерминированного тренда, случайного блуждания и стационарной ошибки, (2.42) и (2.43):

$$y_t = \xi_t + r_t + \varepsilon_t, \quad (2.42)$$

$$r_t = r_{t-1} + u_t, \quad (2.43)$$

где  $y_t$  – временной ряд ( $t = 1, 2, \dots, T$ );

$t$  – детерминированный тренд;

$r_t$  – случайное блуждания, начальное значение  $r_0$ ;

$\varepsilon_t$  – ошибка, вызванная допущением стационарности временного ряда;

$u_t$  – вводимая ошибка, по допущению является рядом равномерно распределенных случайных величин с математическим ожиданием равным нулю и постоянной вариацией.

Нулевая гипотеза стационарности эквивалентна допущению, что вариация случайного блуждания равна нулю. В случае, если  $\xi = 0$  нулевая

гипотеза означает, что процесс является стационарным возле  $r_0$ . Если вариация больше нуля, процесс нестационарный.

Тест КФШШ для нулевой гипотезы стационарности временного ряда среднего значения определяется следующим образом: пусть  $e_t$  – набор значений, равных разнице между временными значениями исходного ряда и средним значением ( $e_t = y_t - \bar{y}$ );  $\hat{\sigma}^2$  – оценка дисперсии, которая равна сумме квадратов ошибок разделенных на количество наблюдений. Частичная сумма ошибок рассчитывается, как, (2.44):

$$S_t = \sum_{i=1}^t e_i, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2.44)$$

Показатель КФШШ рассчитывается по (2.45)

$$\hat{\eta} = T^{-2} \sum \frac{S_i^2}{s^2(k)}, \quad (2.45)$$

где  $s^2(k)$  – оценка вариации.

В тесте вариации рассчитываются по (2.46)

$$s^2(k) = \sum_{t=1}^T e_t^2 + 2 \sum_{j=1}^k w(j, k) \sum_{t=k}^T e_t e_{t-1}, \quad (2.46)$$

где  $w(j, k)$  – весовой коэффициент, который зависит от спектрального окна.

В работе [83] используется окно Бартлета, таким образом  $w(j, k)$  рассчитывается по (2.47):

$$w(j, k) = 1 - \frac{j}{k+1}. \quad (2.47)$$

Рассчитанный показатель КФШШ сравнивается с критическим значением. Если рассчитанный показатель больше этого значения, нулевая гипотеза о стационарности временного ряда отвергается.

В результате анализа определили, что при заданных условиях оптимальный уровень агрегации может быть от одной до двадцати пяти минут. Например, при размере интервала в 20 минут, доля интервалов, которые прошли проверку на стационарность составляет 0,96.

Для построения нейронной сети необходимо определить количество нейронов для различных слоев. Количество нейронов во входном слое можно определить с помощью АКФ (рисунок 2.6).

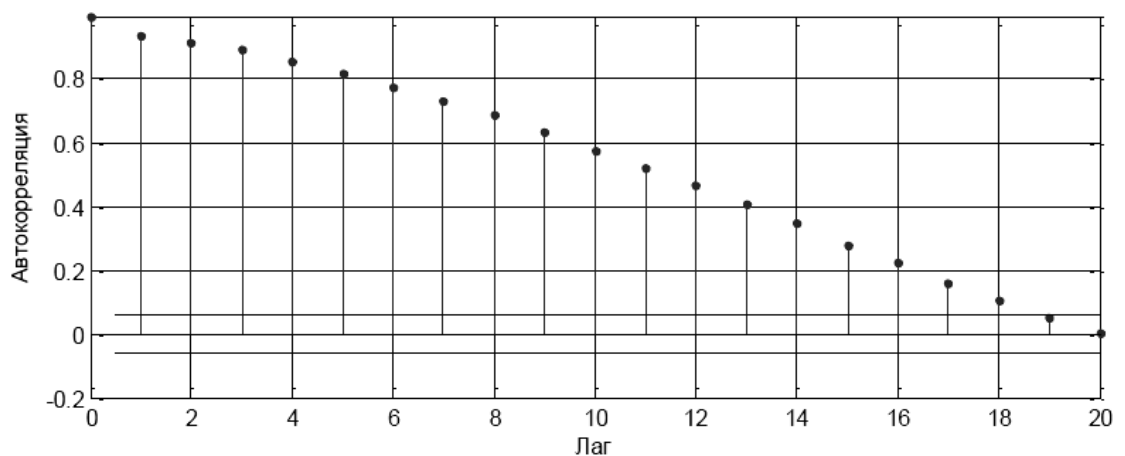


Рисунок 2.6 – АКФ агрегированного на 20-тиминутном интервале трафика

Как можно определить из представленной АКФ, существует зависимость между отсчетами временного ряда на расстоянии 18 лагов, поэтому в ИНС входной слой будет синтезирован из 18 нейронов и нейрона смещения.

Количество нейронов в скрытом слое выберем в соответствии с эмпирическим правилом: оно не должно быть большим, чем удвоенная сумма количества нейронов во входном и выходном слоях [84]. Так, количество нейронов в скрытом слое составит удвоенное количество

нейронов входного слоя. Для улучшения качества обучения необходимо использовать большее количество нейронов в выходном слое, что позволит ИНС изучить структуру трафика более детально. Поэтому предложено использование архитектуры ИНС, представленной на рисунке 2.7

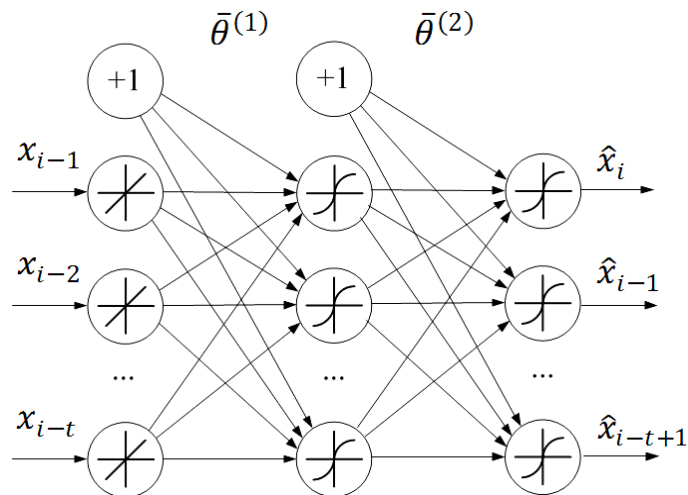


Рисунок 2.7 – Предложенная архитектура ИНС с расширенным выходным слоем.

Для оценки предложенной модели сравним ее с классической: 18 нейронов во входном слое, 36 в скрытом и 1 нейрон в выходном слое (рисунок 2.8).

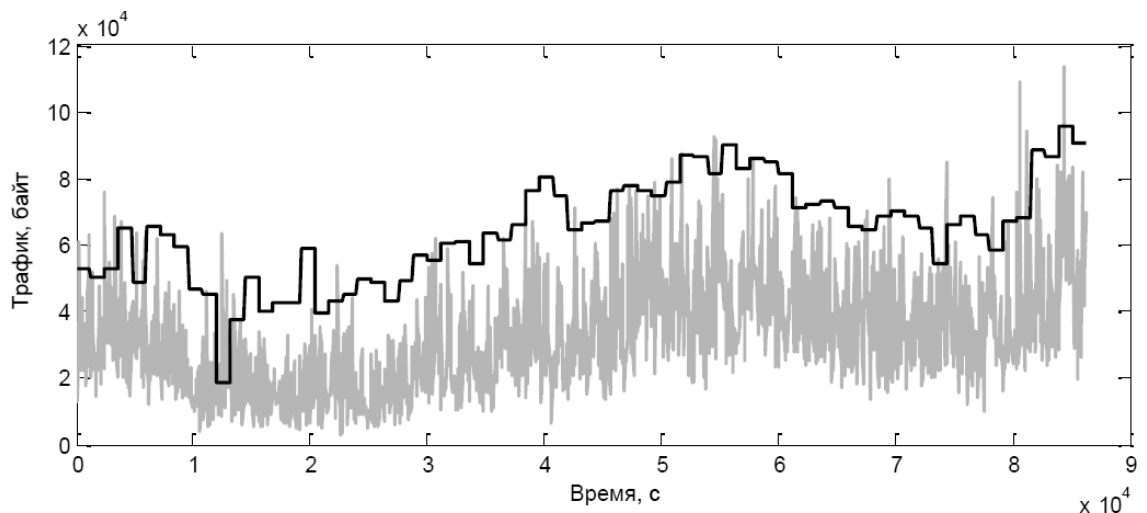


Рисунок 2.8 – Тестовый трафик и выделенная пропускная способность для первой модели

Количество итераций функции оптимизации при обучении ИНС выбираем равным 500, параметр регуляризации,  $\gamma = 0,1$ , проведено 50 итераций моделирования.

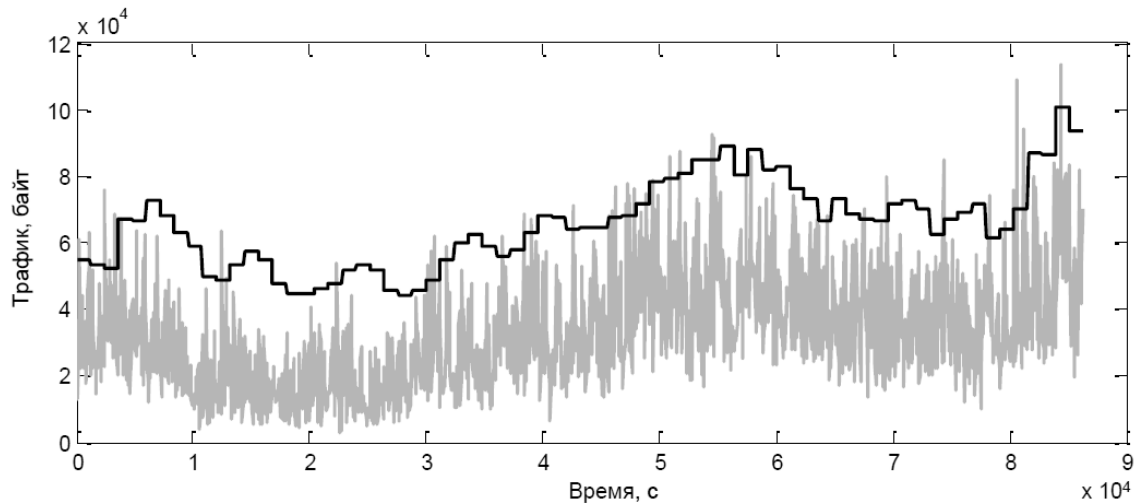


Рисунок 2.9 – Тестовый трафик и выделенная пропускная способность для предложенной модели ИНС

На рисунке 2.9, в качестве модели прогнозирования пропускной способности использована предложенная модель ИНС.

Произведен расчет оценки объема выделяемой пропускной способности согласно предложенным моделям (рисунок 2.10).

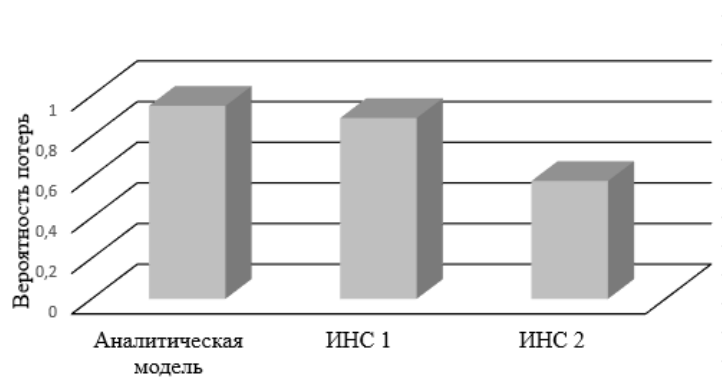


Рисунок 2.10 – Эффективность прогнозирования согласно представленным ИНС и аналитической моделям

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы. Результат прогнозирования на основе модели ИНС, с предложенной модифицированной архитектурой, дает почти в два раза лучший показатель вероятности потерь.

Однако, с помощью этой сети прогнозировать выделяемый объем пропускной возможности нецелесообразно, т.к. показатель утилизации выше. Следовательно, необходимо модифицировать предложенные модели.

#### 2.2.4 Модификации аналитической модели

Ошибка прогнозирования, вносимая в расчеты оценки объема выделяемой пропускной способности, может быть уменьшена за счет использования более точных прогностических моделей. В представленной выше аналитической математической модели, в качестве прогностической, используется упрощенный алгоритм экспоненциального сглаживания. Применение этого алгоритма для процессов с высокой скоростью развития приводит к большим погрешностям прогнозирования. Для уменьшения погрешностей прогнозирования предложены следующие модификации:

– математическая модель с увеличением интервала статистики. Формирование статистических данных происходит в моменты времени, равные этим отсчетам:

$$c_j(i\Delta t) = \lambda_j(n \cdot \Delta t), \quad n = \Delta t, 2 \cdot \Delta t, \dots, \quad (2.48)$$

т.е. оценка значения в интервале статистики фиксируется каждые  $\Delta t$  отсчетов. Расчет оценки пропускной способности в рамках интервала перераспределения производится согласно формуле (2.33);

– математическая модель с увеличением интервала перераспределения. Оценка пропускной способности вычисляется согласно следующему выражению:

–

$$b_j(m\Delta\tau) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k c_j((m(k-1) + i)\Delta t), \quad (2.49)$$

оценка значений трафика в рамках интервала статистики производится согласно (2.32);

– математическая модель максимальных значений осуществляет выбор максимальных значений из отсчетов в рамках интервала статистики и усреднение значений по интервалу перераспределения. Математическое выражение для оценки интенсивностей поступающего трафика в интервале статистики:

$$c_j(i\Delta t) = \max_{l=1..n} (\lambda_j((i(n-1) + l)\Delta t)), \quad (2.50)$$

расчет оценки пропускной способности, при этом будет соответствовать (2.33).

Для всех модифицированных алгоритмов условия расчета объема выделяемой пропускной способности соответствуют выражениям (2.34)-(2.36). Затем, согласно (2.38) - (2.39), произведен расчет оценки объема выделяемой пропускной способности согласно предложенным моделям (рисунок 2.11).

Исходя из величин требуемых параметров качества обслуживания для поступающей последовательности, при оценке объема выделяемой пропускной способности, можно сделать вывод о том, что данные модификации также вносят ошибку прогнозирования. Это связано с «медленной» скоростью адаптации представленных моделей быстроизменяющемуся характеру поступающего трафика.

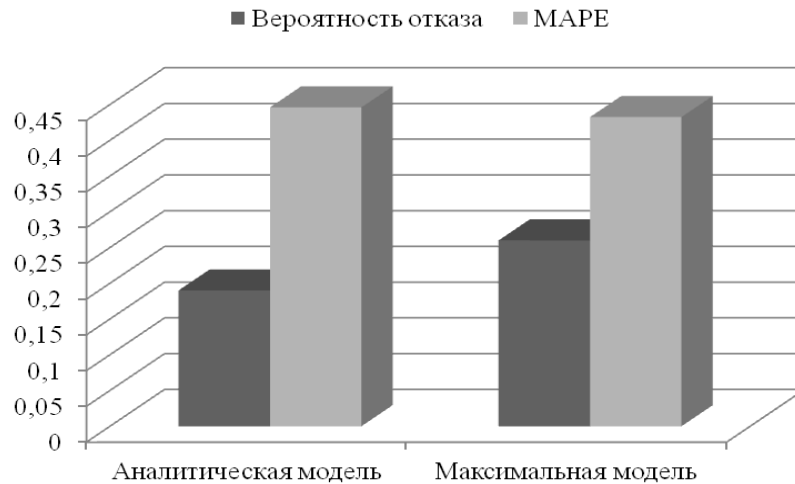


Рисунок 2.11 – Эффективность прогнозирования согласно аналитической и максимальной моделям и параметры качества обслуживания

Следовательно, чтобы математическая модель имела такую же скорость адаптации, как и поступающий трафик необходимо, чтобы первая имела такие же параметры, что и последняя. Это возможно в случае, если использовать в качестве прогностической, модель, точно описывающую поступающий трафик – ARFIMA-модель. В этом случае, соответствующая оценка объема выделяемой пропускной способности определяется исходя из (2.51):

$$b_j(m\Delta\tau) = \max_{i=1..k} (ARFIMA(c_j((m(k-1)+i)\Delta t))), \quad (2.51)$$

где  $ARFIMA(c_j((m(k-1)+i)\Delta t))$  – оценка отсчетов в рамках интервалов статистики, спрогнозированная ARFIMA-моделью.

Условия работы математической модели соответствуют (2.36) – (2.36). Сравнение прогнозных значений требуемых оценок качества согласно аналитической и ARFIMA-модели, представлены на рисунке 2.12.



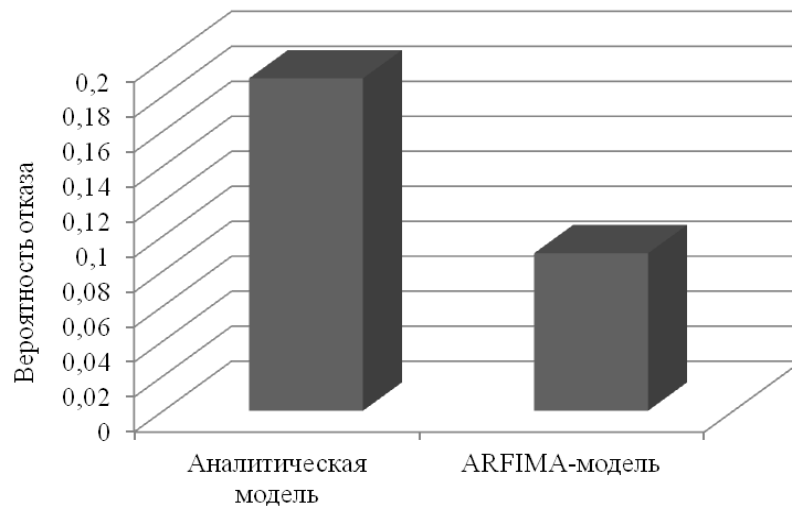


Рисунок 2.12 – Оценки параметров качества обслуживания согласно прогностическим аналитической и ARFIMA-моделям

В ходе исследования работы всех представленных прогностических моделей, в т.ч. ARFIMA-модели, для прогнозирования оценки объема выделяемой пропускной способности, можно сделать следующие выводы.

Если прогнозируемое значение оценки объема выделяемой пропускной способности определяется, исходя из максимальных значений трафика, то повышение точности прогнозной модели приводит к ухудшению параметров качества обслуживания. Это говорит о низкой точности критериев принятия решений, используемых для расчета. Для уменьшения влияния этого недостатка на результат работы прогностических моделей рассмотрим следующие алгоритмы определения критериев принятия решения.

#### 2.2.5 Разработка интегральной оценки для повышения точности прогнозирования

Итак, в представленных математических моделях, принятие решения о необходимой оценке объема выделяемой пропускной способности, сводится к интуитивно простому решению: нахождению максимального или среднего

значения. Это обусловлено технологическими возможностями операторов: на практике обычно отслеживаются пиковые значения скоростей поступающего трафика данных за определенный цикл наблюдения. Математические модели, оперирующие максимальными и средними значениями в этом случае, позволяют «обеспечить» заданные параметры качества обслуживания (величину вероятности потерь). Точность прогнозирования, при этом начинает снижаться при понижении значения параметра качества обслуживания. Данное явление объяснимо свойствами поступающего трафика (пиковые значения обычно больше постоянного уровня трафика в несколько десятков раз). Т.о., значение соответствующей оценки объема выделяемой пропускной способности в десятки раз больше необходимого, с удовлетворительными значениями параметров качества обслуживания и значениями точности прогнозирования [85]. Для уменьшения значения этой оценки необходимо, чтобы значение расчетной оценки объема выделяемой пропускной способности канала была как можно ближе к значению интенсивности поступающего трафика, с выполнением условий (2.34) - (2.36). Т.е., чтобы выполнялось следующее выражение (2.52):

$$b_j(m\Delta\tau) = \frac{\int_{(m-1)\Delta\tau}^{m\Delta\tau} c_j^*(m)\Delta\tau}{\Delta\tau}, \quad (2.52)$$

где  $c_j^*(m\Delta\tau)$  – прогнозируемые значения интенсивности трафика  $j$ -го сервиса для  $m$ -го интервала перераспределения, рассчитанного по следующему выражению (2.53):

$$c_j^*(m\Delta\tau) = ARFIMA(c_j(m(k-1)+i)\Delta\tau)). \quad (2.53)$$

Условия выделения канала объема выделяемой пропускной способности соответствуют (2.34) - (2.36). На рисунке 2.13 представлены графические зависимости эффективности работы математических моделей (классической и интегральной математических моделей).

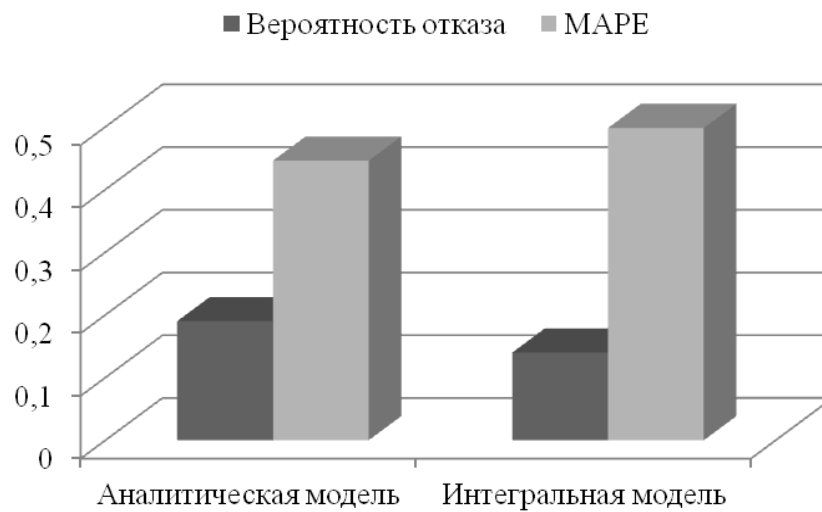


Рисунок 2.13 – Эффективность работы аналитической и интегральной математических моделей

Из соотношений, представленных на рисунке 2.5 видно, что интегральная математическая модель позволяет добиться значения параметров качества обслуживания лучше, чем у аналитической модели. Однако, значение средней абсолютной процентной ошибки прогнозирования при этом возрастает на 10%. И наоборот, уровень потерь, определенный с помощью аналитической модели достаточно высок, хотя значение средней абсолютной процентной ошибки прогнозирования лучше. Таким образом, необходимо использовать комбинации этих двух алгоритмов, в зависимости от скорости изменения поступающего трафика. Для этого, нужно адаптировать начало и конец интервала регулирования таким образом, чтобы они совпадали с началом и концом зон резкого изменения трафика. Следовательно, необходимо рассмотреть задачу о различных величинах интервалов прогнозирования.

### 2.2.6 Математическая ARFIMA-модель с адаптивным интервалом регулирования

Для оценок пропускных способностей формируемых каналов для поступающего трафика  $c_j(m\Delta\tau)$ , где  $j$  – сервис, а  $m$  – последовательность интервалов регулирования, в которых производилась оценка, необходимо зарезервировать пропускную способность для формируемого канала ( $tun_j(\Delta\tau)$ ). При этом последовательность оценок пропускных способностей прогнозируются, согласно выражению (2.53). Начало и конец интервала регулирования находится исходя из значений  $Q(m\Delta\tau)$  – функции приращения скорости изменения трафика, которая рассчитывается для реализации  $c_j^*(m\Delta\tau)$ :

$$Q(m\Delta\tau) = \frac{c_j^*(m\Delta\tau) - c_j^*((m-1)\Delta\tau)}{c_j^*(m\Delta\tau)}. \quad (2.52)$$

Если  $Q(n\Delta t) > 1$ , то текущий отсчет трафика фиксируется как начало интервала регулирования. Если значение  $Q(n\Delta t)$  меняет знак с отрицательного на положительный, то текущий отсчет трафика фиксируется как конец интервала регулирования. Аналогично происходит расчет, если прогнозируемый трафик резко убывает, только при значениях  $Q(n\Delta t) < -1$  для начала интервала регулирования и изменение знака с положительного на отрицательный соответственно. В том случае, если в течение интервала прогнозирования интенсивность трафика существенно не изменялась, т.е.  $-1 < Q(n\Delta t) < 1$ , то началом и концом интервала регулирования считается начало и конец интервала наблюдения. Т.о., математическая модель определения начала и конца интервала регулирования будет выглядеть так:

$$m\Delta\tau = \begin{cases} m\Delta\tau, & Q(m\Delta\tau) > 1 \\ m\Delta\tau, & Q(m\Delta\tau) < -1, \\ m\Delta\tau_p & \end{cases} \quad (m+1)\Delta\tau = \begin{cases} m\Delta\tau, & Q(m\Delta\tau) = 0 \\ m\Delta\tau, & Q(m\Delta\tau) = 0, \\ (m+1)\Delta\tau_p & \end{cases} \quad (2.53)$$

где  $m\Delta\tau_p$  – интервал прогноза.

Оценка пропускной способности формируемого канала определим согласно формуле (2.52). Условиями формирования канала заданной пропускной способности остаются выражения (2.34) - (2.36). Результаты оценок представлены на рисунке 2.14.

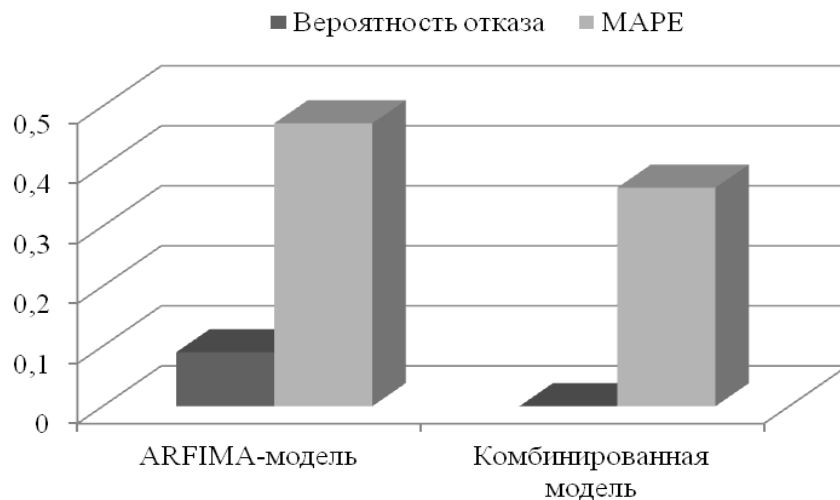


Рисунок 2.14 – Параметры качества обслуживания математических ARFIMA-моделей с равномерным и адаптивным интервалами регулирования

По представленным зависимостям можно сделать вывод об уменьшении величины средней абсолютной процентной ошибки прогнозирования (до 36,3%) и доли потерь (до нулевого значения) при работе исследуемой математической модели. Как указано прежде, в качестве базовой оценки величины объема выделяемого канального ресурса, используется оценка объема выделяемой пропускной способности, т.е. аналитическая модель. Для обобщения и наглядности полученных

результатов, последние приведены в единых виде графических зависимостей на рисунке 2.15.

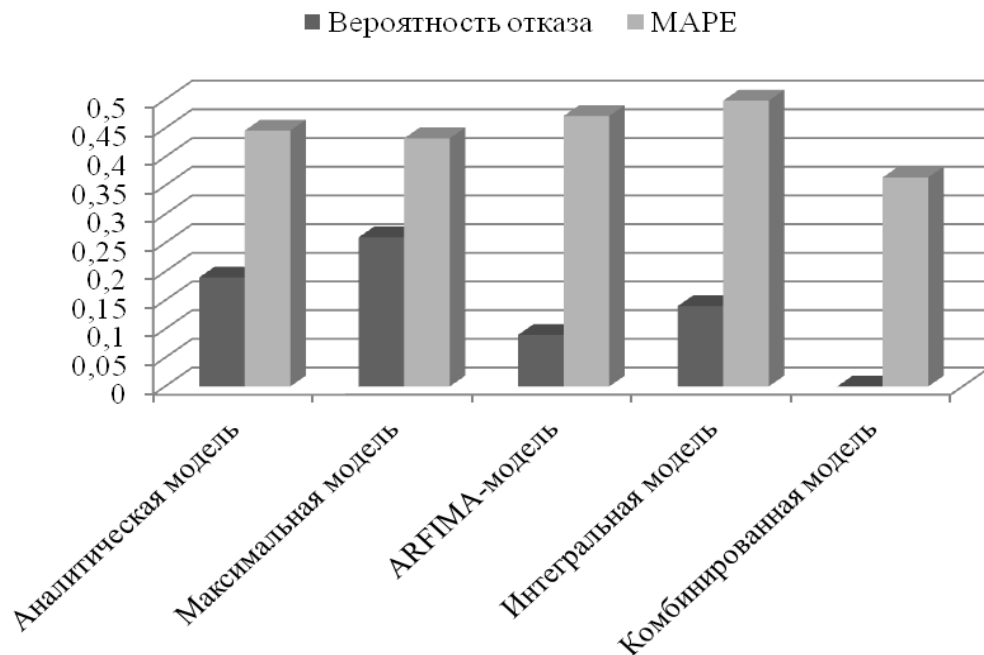


Рисунок 2.15 – Результаты работы моделей прогнозирования оценки величины выделяемой пропускной способности

Для объяснения причин возникновения таких значений оценки параметра качества обслуживания, при высоком значении оценки утилизации канального ресурса, сделан анализ изменения последнего в зависимости от типа поступающего трафика. В качестве исследуемых зависимостей предложены трафики, создаваемые приложениями в отдельности: трафик голосовой связи, трафик видео связи, трафик передачи данных и мультисервисный трафик с низкой фрактальностью.

Исходя из этого, сделаны следующие выводы: модель с адаптивным размером интервала перераспределения позволяет уменьшить величину средней абсолютной процентной ошибки прогнозирования (до 0,363) и доли потерь (до нулевого значения). Величина такой оценки, как задержка при передаче пакета ( $D_i$ ) зависит от качества его обработки в сетевом

устройстве: механизма планирования обработки пакетов в очередях контроллера базовых станций.

### 2.3 Разработка прогнозной модели оценки уровня вносимых задержек при обслуживании подключаемого абонента

Как было отмечено в пп. 1.2.2, случайная составляющая трафика формирует его специфические характеристики. Обычно процедура уменьшения пачечености поступающего в сеть трафика, либо его кондиционирование, используется для максимально возможного исключения вероятностной составляющей из природы трафика. В качестве средств кондиционирования трафика могут использоваться как средства допуска нагрузки (Leaky bucket, Token bucket) так и планировщики обслуживания очередей [86].

Рассмотрим одну из математических моделей планировщика, временные диаграммы работы которого представлены на рисунке 2.16.

Идея планировщика обслуживания очередей в сетевом устройстве связана с понятием функции «виртуальное время» [87, 88, 89]. Физический смысл данной функции состоит в нахождении определенного момента времени, к которому привязываются все процессы поступления и обслуживания пакетов в планировщике.

Рассмотрим основные принципы работы этой функции. Пусть время поступления первого пакета  $t_1 = 0$ .

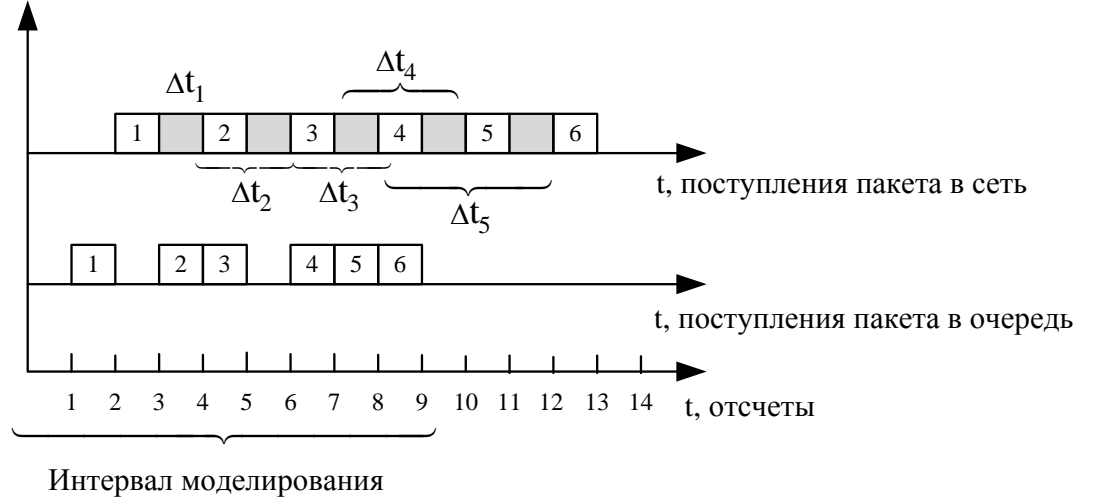


Рисунок 2.16 – Временные диаграммы работы планировщика

Значение функции «виртуальное время»  $V(t)$ , если отсутствует нагрузка равно 0, а в некоторый период  $\tau \leq t_j - t_{j-1}$ , может быть вычислено в соответствии со следующим выражением:

$$V(t_{j-1} + \tau) = V(t_{j-1}) + \sum_{i \in B_j} \frac{\tau}{r_i}, \quad j = 2, 3, \dots, \quad (2.54)$$

где  $B_j$  – потоки, у которых хотя бы один из пакетов стоит в очереди на обслуживание («бэклог»-потоки).

Функция «виртуальное время» может быть также интерпретирована как скорость, с которой обслуживаются «бэклог»-потоки. Пусть  $k$ -й пакет,  $i$ -го потока поступает в одну из очередей классификатора в момент времени  $a_{i,k}$  и имеет длину  $L_{i,k}$ . Тогда значение «виртуальное время» окончания обслуживания  $F_{i,k}$  может быть определено из соотношения:

$$S_{i,k} = \max \{ F_{i,k-1}, V(a_{i,k}) \}, \quad (2.55)$$

$$F_{i,k} = S_{i,k} + \frac{L_{i,k}}{r_i}, \quad (2.56)$$



где  $S_{i,k}$  – значение параметра «время поступления»  $k$ -го пакета  $i$ -го потока в очередь;

$F_{i,k}$  – значение параметра «время окончания обслуживания»  $k$ -го пакета  $i$ -го потока;

$V(a_{i,k})$  – значение функции «виртуальное время» в момент времени  $a_{i,k}$  для  $k$ -го пакета  $i$ -го потока;

$L_{i,k}$  – длина  $k$ -го пакета,  $i$ -го потока;

$r_i$  – величина пропускной способности, выделяемая для обслуживания  $i$ -го потока.

Перепишем выражения (2.55) и (2.56) для  $N$  «бэклог»-потоков, причем  $N < m$ , где  $m$  – количество очередей в сетевом устройстве:

$$F(k+1) = \max \{ F(k), V(a(k+1)) \} + \frac{L(k+1)}{r}, \quad (2.57)$$

где  $F$  – вектор-столбец значений «виртуального времени» окончания обслуживания, размерности  $N \times 1$ ;

$N$  – количество «бэклог»-потоков.

Матрица  $V$ , с размерностью  $N \times N$ , характеризует значения функции «виртуальное время» поступления пакетов в очереди классификатора. Постоянная величина  $r$  характеризует величину пропускной способности, которая выделяется под  $N$  «бэклог»-потоков. Вектор-столбец  $L(k+1)$  характеризует длины пакетов, поступающих в очереди классификатора. Таким образом, выражение (2.57) отображает динамику работы планировщика со взвешенным обслуживанием очередей. Применения данного способа кондиционирования трафика по представленной выше математической модели априори предполагает следующие трудности: сложность в вычислениях, из-за нелинейности уравнения (2.57) и ухудшение

показателей качества обслуживания, так как потоки будут задерживаться, ожидая обслуживания. Следовательно, представленная математическая модель должна быть модифицирована для устранения либо ослабления этих недостатков.

## 2.4 Выводы по разделу 2

В главе выделены основные составляющие для решения поставленной научно-практической задачи:

- разработка прогностических моделей оценки объема выделяемой пропускной способности для подключаемого абонента;
- разработка критерия оценки выигрыша выделяемого канального ресурса для подключаемого абонента;
- модифицирование существующих моделей планировщиков обслуживания очередей для оценки уровня вносимых задержек при обслуживании подключаемого абонента.

В пп. 2.1 проведен анализ классического подхода к определению качества работы транспортной сети. Классический подход основан на использовании положений теории телетрафика, в частности формулы Норроса, для определения основных показателей качества обслуживания (задержка, вероятность потерь пакетов), а также эмпирические формулы. К достоинствам метода можно отнести его универсальность. Независимо от вида поступающего трафика имеются возможности его оценки. Основным недостатком классического подхода остается его статистический характер, что для современных реалий недопустимо.

В пп. 2.2 рассмотрен вопрос разработки прогностических моделей оценки объема выделяемой пропускной способности для подключаемого абонента. Для этого сделана оценка реализации поступающего в БС трафика и сформулирован вывод о его степени самоподобия. Отмечено, что определение характеристик для его прогнозирования, остается актуальной

исследовательской задачей. Рассмотрена аналитическая модель прогнозирования. Отмечено, что к основным недостаткам классической модели относятся несовершенство прогнозируемой оценки величины пропускной способности и медленная скорость адаптации к интенсивности поступающего трафика. Каждый из вышеперечисленных недостатков вносит свою долю погрешности в прогноз оценки выделяемой пропускной способности. Все это приводит к основному недостатку классической модели – высокому объему используемого канального ресурса. Для ослабления этого недостатка предложены следующие модификации: увеличение размера интервала статистики; увеличение размера интервала регулирования; модель максимальных значений. Точность прогнозирования для перечисленных моделей также невелика. Это связано с неспособностью точно описывать процесс формирования трафика. На основе этого сделан вывод о необходимости использования ARFIMA-модели. Еще один, немаловажный вывод, сделан исходя из анализа формирования оценок прогнозирования. Перечисленные в пп. 1.4 оценки точности прогнозирования будут использоваться для модели в целом. В пп. 2.2.3, в качестве модели прогнозирования предложено использовать ИНС. Для этого определены параметры модели, сделан вывод о горизонте прогнозирования, при котором ряд считается стационарным. Анализ результатов моделирования показал, что модель необходимо модифицировать из-за достаточно большого коэффициента утилизации. В пп. 2.2.4 разработана интегральная оценка, с последующим изменением скорости адаптации к условиям поступающего трафика. Интегральная математическая модель позволяет добиться значения параметров качества обслуживания лучше, чем у аналитической модели. Однако, значение средней абсолютной процентной ошибки прогнозирования при этом возрастает до 10%. Для снижения данного недостатка сделано предположение о необходимости адаптации интервалов регулирования к скорости изменения трафика. В пп. 2.2.5 предложена ARFIMA-модель с адаптивным интервалом прогнозирования. Данная модель позволила

уменьшить значение средней абсолютной процентной ошибки прогнозирования до 18% и качественно улучшить значение показателя параметра качества обслуживания. Таким образом, получил дальнейшее развитие метод прогнозирования оценки пропускной способности транспортной сети, отличающийся от существующих использованием прогностической ARFIMA-модели, которая учитывает фрактальные свойства поступающего трафика. Использование данного метода позволяет увеличить эффективность использования канальных ресурсов при обеспечении заданных параметров качества обслуживания. Рассматриваемые в разделе вопросы опубликованы в научной работе соискателя [90].

Повышение точности прогнозирования можно достичь путем уменьшения пачечности трафика: путем кондиционирования. В пп. 2.3 рассматривается одно из средств – планировщик обслуживания пакетов. Так, предложено модифицирование существующей модели планировщика пакетов. Для этого функция «виртуальное время» описана в терминах Max-plus алгебры. Данная формализация позволяет получить линейные зависимости для нелинейных выражений и использовать их в прикладной задаче нахождения необходимого объема буфера при заданном уровне качества обслуживания.

**РАЗДЕЛ 3****ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОЦЕНОК  
КАЧЕСТВА РАБОТЫ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ МОС**

На основе предложенных во втором разделе математических моделей, предполагается разработка гибридного метода прогнозирования оценок качества работы транспортной сети МОС. Данный раздел направлен на разработку и описание методов прогнозирования основных характеристик работы транспортной сети МОС и обоснования комплексного показателя качества работы транспортной сети МОС.

**3.1 Метод прогнозирования пропускной способности транспортной сети, основанный на оценке скорости подключения**

Один из существующих методов оценки пропускной способности транспортной сети учитывает ее технологию и услуги, получаемые конечными пользователями. Исходя из того, что наибольшей популярностью среди абонентов пользуется услуга доступа в Интернет, определим среднюю скорость подключения абонента для текущей емкости абонентской базы, с учетом того, что нагрузка VoIP и число каналов IPTV, согласно пп. 2.3, останутся прежними. При этом, известна имеющаяся пропускная способность магистрального канала 10 Гбит/с, а неизвестна – максимальная нагрузка по услуге подключения к сети Интернет.

Пропускная способность канала с учетом требуемых пропускных способностей для VoIP и IPTV составит:

$$C = 10000 - (C_{VoIP} + C_{IPTV}). \quad (3.1)$$

Искомое значение составит 9741,07 Мбит/с.

По формулам (2.6) и (2.7) определим максимальное значение нагрузки на канал передачи, при котором уровень задержки не превысит 30 мс. С помощью итерационных расчетов, определено, что разрешенное значение нагрузки лежит в пределах от 6818,74 Мбит/с до 7792,85 Мбит/с, со значением  $\rho = 0,7 \div 0,8$ . Результаты расчета представим в виде зависимости на рисунке 3.1.

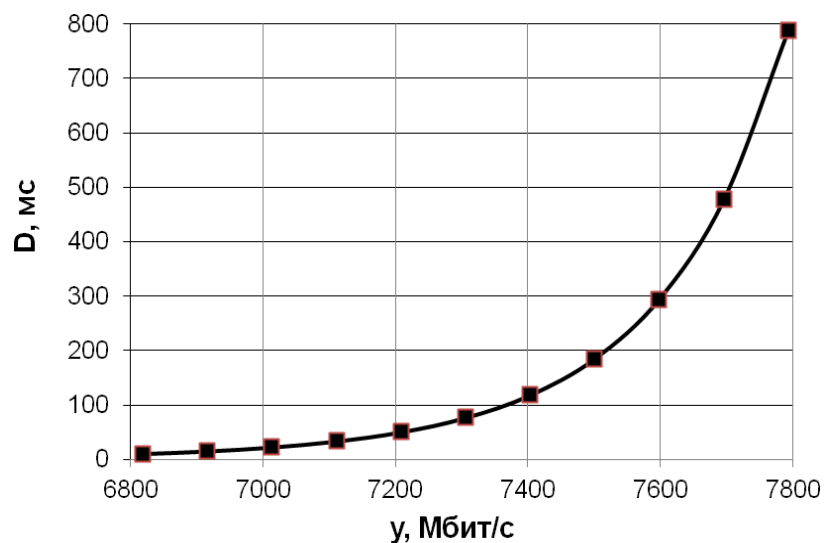


Рисунок 3.1 – График зависимости величины задержки от нагрузки на канал передачи

Из полученных результатов нам видно, что для обеспечения требуемых параметров QoS, которым должны отвечать сети I класса, максимальная нагрузка услуги подключения Интернет и передачи данных должна составить не более 7110,98 Мбит/с. При исключении служебных данных, максимально возможная нагрузка составляет 6892,91 Мбит/с, при этом необходимо использовать буфер размером не менее 27186 пакетов.

Средняя скорость подключения абонента определяется по (3.2)

$$y = N \cdot d_s \cdot \frac{d_{RX}}{30}, \quad (3.2)$$

где  $N$  – количество абонентов, подключенных к услуге передачи данных и доступа в сеть Интернет;

$d_s$  – средняя скорость подключения абонента, МБит/с;

$d_{RX}$  – время, необходимое для приема среднемесячного объема данных на максимальной скорости доступа, сутки;

По оценкам, полученным в пп. 2.3, объем потребляемого трафика 2800 абонентами составляет 16700,9 Гбит при средней скорости подключения одного абонента составляет в 1 Мбит/с.

Интенсивность нагрузки потребляемого трафика абонентами, подключенными к услуге передачи данных и Интернет:

$$d_{RX} = \frac{\frac{V}{N_{подкл}} \cdot 8}{t_{сутки} \cdot d_s}, \quad (3.3)$$

где  $V$  – объем трафика, потребляемого абонентами;

$N_{подкл}$  – число подключенных абонентов к услуге передача данных и Интернет.

Тогда, исходя из входных данных оператора и выражения (3.4) сделаем прогноз необходимой пропускной способности транспортного канала связи:

$$V_{RX} = \frac{V}{N_{подкл}}. \quad (3.4)$$

Таким образом, при количестве подключаемых пользователей  $N = 2800$ , получаем зависимость оценки пропускной способности транспортного канала связи от средней скорости подключения (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Зависимость оценки пропускной способности транспортного канала связи от средней скорости подключения

Величина коэффициента утилизации канала, также будет зависеть от технологии организуемого транспортного канала. Так, для скоростей передачи в 1 Гбит/с значение составит от 0,84 до 0,994.

Т.о., при обеспечении требуемых параметров QoS, каналы транспортной сети будут недогружены, что говорит о том, что эффективность работы сети низкая.

### 3.2 Разработка метода прогнозирования оценки надежности транспортной сети

Пусть рассматриваемая система состоит из следующих компонент [91]:

- базовая станции ( $Bs$ );
- множество ( $Mc$ ) малых сот ( $T_{\{1, \dots, Mc\}}$ );
- множество ( $C$ ) промежуточных соединителей ( $R_{\{1, \dots, c\}}$ );
- устройство, создающее помехи ( $J$ );
- множество ( $N$ ) дополнительных устройств, прослушивающих исходный сигнал ( $E_{\{1, \dots, n\}}$ ), которые его ослабляют;



– устройство-получатель услуг ( $D$ ).

К базовой станции  $B_s$  подключена малая сота с помощью беспроводной транспортной сети  $T_{Mc}$ . Предположим, что между  $T_{Mc}$  и устройством-получателем услуг  $D$  не существует прямой связи, из-за плохого качества беспроводного канала.  $T_{Mc}$  посылает сигнал к  $D$  через  $R_c$ . Устройство  $J$  создает помехи, которые в устройстве-получателе могут быть ослаблены [92]. Иные устройства  $E_n$  прослушивают информацию, переданную от  $R_c$ . Считаем, что у всех узлов существует одна антенна, позволяющая осуществлять передачу информации в полудуплексном режиме. Для определенности предположим, что все каналы подвержены  $m$ -затенению Накагами и мощность канала описывается гамма распределением. Функция распределения и плотность вероятности случайной величины  $X$  представлены (3.5) и (3.6):

$$F_x(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\theta_x}\right) \sum_{i=0}^{m_x-1} \frac{1}{i!} \left(\frac{x}{\theta_x}\right)^i}, \quad (3.5)$$

$$f_x(x) = \frac{x^{m_x-1}}{\Gamma(m_x)\theta_x^{m_x}} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\theta_x}\right)}, \quad (3.6)$$

где  $\theta_x$  – выборочное среднеквадратичное отклонение случайной величины  $x$ ;

$m_x$  – выборочная средняя случайной величины  $x$ ;

$\Gamma(m_x)$  – неполная гамма-функция.

Надежность транспортной сети моделируется как процесс Бернулли  $I_{Mc}$  с вероятностью успеха  $p_{Mc}$ , где  $P(I_{Mc^*}=1) = p_{Mc}$  и  $P(I_{Mc^*}=0) = 1 - p_{Mc}$ . Это означает что, если пакет успешно доставлен по транспортной сети с вероятностью  $p_{Mc}$  и  $T_{Mc}$  участвует в передаче и, если пакет доставлен с вероятностью  $1 - p_{Mc}$ , то не участвует. Также предположим, что информация

о том, что мощность сигнала, который ослабляется иными устройствами, известна и может быть отслежена.

Сигналы, полученные на первом шаге в промежуточных соединителях, имеют следующий вид (3.7):

$$s_R = \sqrt{P_t \cdot \alpha_T^{c,n}} \cdot h_{T_{Mc}R_c} \cdot I_k \cdot x + z, \quad (3.7)$$

где  $P_t$  – мощность, переданная от  $T_{Mc}$ ;

$\alpha_T^{c,n}$  – компонента потерь на трассе;

$h_{T_{Mc}R_c}$  – коэффициент канала для соединения  $T_{Mc}$  -  $R_c$ ;

$x$  – блок мощности переданного символа

$z$  – комплексный аддитивный белый Гауссовский шум.

Сигналы, полученные на втором шаге устройством-получателем услуг, имеют следующий вид (3.8):

$$s_D = \sqrt{P_r \cdot \alpha_D^c} \cdot h_{R_cD} \cdot x + z, \quad (3.8)$$

где  $P_r$  – мощность, переданная к промежуточным соединителям;

$h_{R_cD}$  – коэффициент канала для соединения  $R_c$  -  $D$ ;

$\alpha_D^n$  – компонента потерь на трассе.

Аналогично, сигналы, полученные в  $E$  будут иметь вид (3.9):

$$s_E = \sqrt{P_r \cdot \alpha_E^{c,n}} \cdot h_{R_cE_n} \cdot x + \sqrt{P_j \cdot \alpha_j^n} \cdot h_{JE_n} + z, \quad (3.9)$$

где  $P_j$  – мощность, полученная в устройстве, создающем помехи;

$h_{R_cE_n}$  – коэффициент канала для соединения  $R_c$  -  $E_n$ ;

$h_{JE_n}$  – коэффициент канала для соединения  $J$  -  $E_n$ ;

$\alpha_E^{c,n}$ ,  $\alpha_j^n$  – компоненты соответствующих потерь на трассе;

Предположим, что ненадежным каналом может быть абсолютно любой от  $M_c$ -го передатчика. Т.о, используя выражение (3.7) можно определить соотношение сигнал/шум:

$$SNR_{T_{Mc}R_c} = \frac{P_t \cdot \alpha_T^{c,n} |h_{T_{Mc}R_c}|^2}{\sigma_c^2} \cdot I_k = \tilde{\alpha}_R \cdot |h_{T_{Mc}R_c}|^2 \cdot I_k = \lambda^{c,n} \cdot I_k. \quad (3.10)$$

При этом  $\lambda^{c,n} \approx Ga(m_R, \theta_R)$ .

Аналогично определим соотношения сигнал/шум для оставшихся участков (3.11), (3.12):

$$SNR_{R_cD} = \frac{P_r \cdot \alpha_D^c \cdot |h_{R_cD}|^2}{\sigma_c^2} = \tilde{\alpha}_D \cdot |h_{R_cD}|^2 = \lambda_D^c, \quad (3.11)$$

$$SNR_{R_cE_n} = \frac{P_r \cdot \alpha_E^{c,n} \cdot |h_{R_cE_n}|^2}{\sigma^2 + P_j \cdot \alpha_j^n \cdot |h_{JE_n}|^2} = \frac{\tilde{\alpha}_E \cdot |h_{R_cE_n}|^2}{1 + \tilde{\alpha}_J \cdot |h_{JE_n}|^2} = \frac{\lambda^{c,n}}{1 + \lambda^{c,n}}. \quad (3.12)$$

Согласно представленным выражениям, схема выбора состоит в максимизации производительности на промежуточных соединителях и устройстве-получателе услуг и минимизации производительность у множества иных устройств.

Схема выбора работает следующим образом. На первом этапе каждый соединитель выбирает малую соту, которая может обеспечить наилучшую производительность линии  $T_{Mc} - R_C$ . Таким образом, лучшая малая ячейка выбирается, исходя из (3.13).

$$Mc^* = \arg \max_{k=1 \dots Mc} SNR_{T_{Mc}R_c}. \quad (3.13)$$

На следующем этапе выбирается такое устройство, прослушивающее исходный сигнал, если соотношение сигнал/шум максимально, (3.14):

$$n^* = \arg \max_{k=1..Mc} SNR_{R_c E_n} . \quad (3.14)$$

Промежуточный соединитель выбирается, когда отношение сигнал/шум соединения  $R_c - E_n^*$  минимизируется, согласно выражению (3.15):

$$c^* = \arg \min_{k=1..c} SNR_{R_c E_n^*} . \quad (3.15)$$

Промежуточный соединитель используют протокол декодирования и пересылки для обеспечения высокой производительности системы. Это связано с тем, что в этом протоколе интерференция ниже, по сравнению с протоколом с усилением и прямой передачей. Таким образом, сквозное значение отношения сигнал/шум рассматриваемой системы в устройстве-получателе услуг (3.16):

$$SNR_{DF} = \min(SNR_{T_{Mc} * R_c^*}, SNR_{R_c^* D}) , \quad (3.16)$$

где  $SNR_{T_{Mc} * R_c^*}$  – отношение сигнал/шум от выбранной малой соты, переданной к выбранному промежуточному соединителю;

$SNR_{R_c^* D}$  – отношение сигнал/шум от выбранного промежуточного соединителя к устройству-получателю услуг.

Рассмотрим характеристики вероятности потери целостности информации и ненулевого достижимого уровня целостности информации на основе выражений, полученных выше. Для определения этих характеристик в первую очередь необходимо определить уровень целостности данных.

Емкость целостности данных равна разнице между основным каналом и прослушивающим каналом, которая может быть представлена, как (3.17):

$$c_s = \frac{1}{2} \left[ \log_2(1 + SNR_{DF}) - \log_2(1 + SNR_{R_c * E_n^*}) \right]^+, \quad (3.17)$$

где  $[x]^+ = \max(x, 0)$ ;

$\log_2(1 + SNR_{DF})$  – полученная мгновенная мощность устройством-получателем услуг от выбранного промежуточного соединителя;

$\log_2(1 + SNR_{R_c * E_n^*})$  – полученная мгновенная мощность от выбранного промежуточного соединителя до выбранного устройства, прослушивающего исходного сигнала.

Вероятность нарушения целостности информации вводится для оценки безопасности системы и определяется как вероятность того, что оценка мгновенной целостности информации меньше положительного целевого уровня секретности  $\theta$ , (3.18):

$$P_{out}(\theta) = P(c_s < \theta) = \int_0^\infty F_{SNR_{DF}}(2^{2\theta}(1+x)-1) \cdot f_{SNR_{R_c * E_n^*}}(x) dx. \quad (3.18)$$

Выражение (3.18) можно трансформировать в (3.19):

$$P_{out}(\theta) = 1 + J \sum_D \sum_E \sum_{\alpha=0}^{\beta} \binom{\beta}{\alpha} (Y-1)^{\beta-\alpha} Y^\alpha \theta_E^{\tilde{\beta}} e^{-\Phi(Y-1)} (J_1 - J_2 + J_3). \quad (3.19)$$

Учитывая выражение (3.19) получаем асимптотическое выражение для вероятности потери целостности информации, (3.20):

$$P_{out}^\infty(\theta) \stackrel{\theta_D \rightarrow \infty}{=} 1 + J \sum_{D^\infty} \sum_E \sum_{\alpha=0}^{\tilde{\beta}} \binom{\tilde{\beta}}{\alpha} (Y-1)^{\tilde{\beta}-\alpha} Y^\alpha \theta_E^{\tilde{\beta}} e^{-\tilde{\Phi}(Y-1)} (J_4 - J_5 + J_6). \quad (3.20)$$

Рассматриваемые в подразделе вопросы опубликованы в научной работе соискателя [93].

### 3.3 Метод прогнозирования оценки размера буфера контроллера базовой станции

Алгоритм планировщика с взвешенным обслуживанием очередей состоит в оценке времени окончания обслуживания пакета для активных очередей (на обслуживании в очереди находится хотя бы один пакет) и, на основании этого принимается решения об очередности обслуживания того или иного пакета определенной очереди [94]. Для формализации задачи об эффективном использовании исходящего канала (канала выходного интерфейса) с заданным качеством обслуживания введем следующие ограничения, (3.21) - (3.23):

$$\tilde{d} \leq d_{\max}, \quad (3.21)$$

$$r^{\text{вых}} \leq r^{\text{треб}}, \quad (3.22)$$

$$\sum_{i=1}^N r_i^{\text{вых}} \leq C, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (3.23)$$

где  $d_{\max}$  – вектор максимально допустимых задержек для потоков в очередях;

$N$  – число «бэклог» потоков и размерность векторов;

$r^{\text{треб}}$  – вектор необходимых, согласно заданным требованиям, интенсивностей обслуживания очередей;

$r^{\text{вых}}$  – вектор интенсивностей обслуживания потоков;

$C$  – скорость выходного интерфейса.

Оптимизационная задача эффективного использования общего канального ресурса планировщиком может быть сформулирована следующим образом, (3.24):

$$\frac{\sum_{i=1}^N r_i^{blx}}{C} \rightarrow 1, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (3.24)$$

Решение поставленной оптимизационной задачи сводится к нахождению необходимого времени нахождения пакетов в буферах различных очередей, что может быть интерпретировано либо как внесение некоторых задержек  $D$  в процесс обслуживания каждой из очередей либо как минимальный размер соответствующего буфера. Поставленная оптимизационная задача (3.24) сводится к нахождению решения обратной задачи. Вектор  $r^{blx}$ , в этом случае, может быть задан, как вектор прогнозируемых (расчетных) значений прогнозных оценок объема выделяемой пропускной способности. Перепишем уравнение (2.28) в терминах идемпотентной алгебры, (3.25):

$$F(k+1) = F(k) \oplus V(a(k+1)) \otimes \frac{L(k+1)}{r}, \quad (3.25)$$

где  $V(a(k+1))$  – функция, характеризующая времена поступлений пакетов в одну из очередей планировщика.

Учитывая, что интенсивность обслуженного трафика равна отношению количества обслуженной информации к интервалу времени между поступлениями этой информации, вектор  $r^{blx}$  можно оценить следующим образом, (3.26):

$$r^{blx} = \frac{L(k+1)}{F(k+1) - F(k)}, \quad (3.26)$$

где  $F(k)$  – вектор, характеризующий временные моменты окончания обслуживания  $k$ -го пакета.

Для качественной оценки предложенной модели воспользуемся статистическими данными, собранными в результате мониторинга трафика программой-снифером. Эти данные были обработаны следующим образом. Исходя из (3.25) получен вектор «окончания обслуживания». Затем, исходя из (3.26), а также количества обработанных пакетов за секунду, получен вектор выходных интенсивностей. Для вектора выходных интенсивностей была оценена величина пропускной способности формируемого канала и параметры качества обслуживания. Оценка пропускной способности формируемого канала производилась с помощью математической ARFIMA-модели с адаптивным интервалом регулирования (комбинированная модель). Среднее значение вероятности потерь, полученное в результате, составляет не менее 5%. Для трафика мультимедийных приложений значение уровня потерь должно быть не более 2,5%. Для улучшения данного показателя можно воспользоваться следующими техниками: увеличить тактовую частоту обработчика пакетов, изменить размер буфера для хранения рекомендуемого числа пакетов, назначить приоритетные очереди.

Первая техника не может быть реализована без изменения аппаратной целостности устройства. Назначение приоритетных очередей может привести к потерям трафика в очередях, обладающих низким приоритетом. Рассмотрим реализацию второй техники.

Для нахождения необходимого значения емкости буфера математически достаточно найти разницу между значениями функций «виртуальное время» обслуживания для кондиционированного и не кондиционированного трафиков, решив уравнение (3.25) относительно функции  $\tilde{V}(a(k+1))$ .



$$\frac{L(k+1)}{r} \otimes \tilde{V}(a(k+1)) = \tilde{F}(k+1),$$

$$\tilde{V}(a(k+1)) = \frac{L(k+1)}{r} \otimes' \tilde{F}(k+1), \quad (3.27)$$

$$D = \tilde{V}(a(k+1)) - V(a(k+1)). \quad (3.28)$$

Оценка результатов моделирования произведена следующим образом: для исходного трафика определяется необходимая пропускная способность и вероятность потерь для каждого цикла моделирования  $k$ , трафик кондиционируется и для кондиционированного трафика также определяется вероятность потерь. На графике (рисунок 3.3) представлены вероятности потерь для каждого из трафиков для каждого цикла расчета.

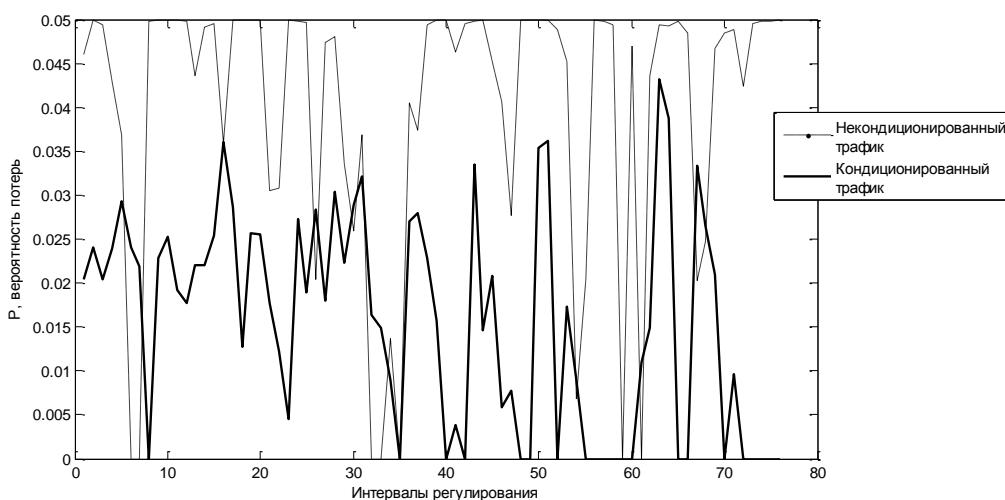
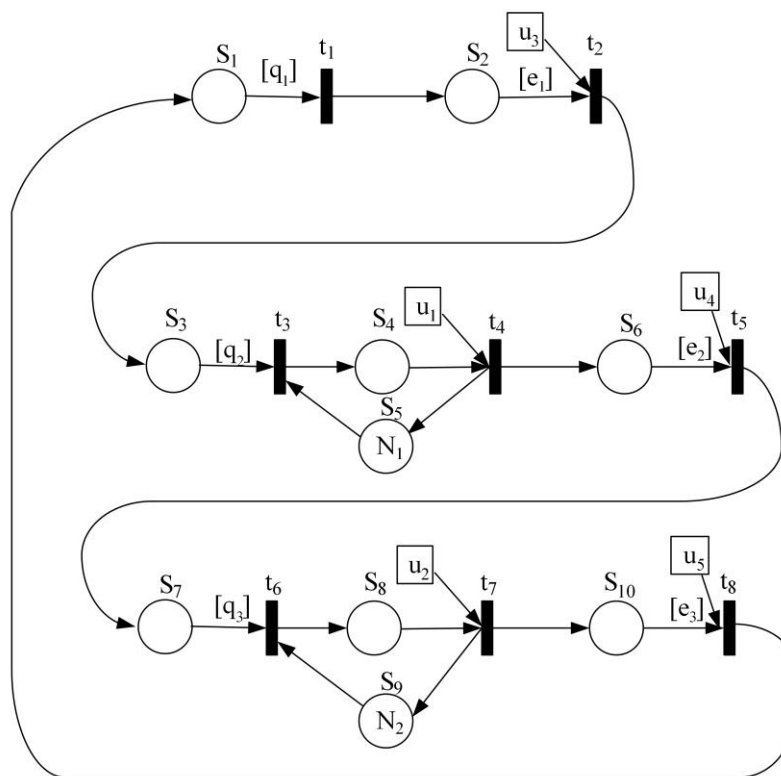


Рисунок 3.3 – Результаты работы модели планировщика с использованием техники кондиционирования трафика

Исходя из представленных зависимостей, данный алгоритм уменьшает вероятность потерь почти в два раза. Однако, такой расчет не предполагает соблюдения классической схемы взвешенного распределения ресурсов из-за отсутствия синхронизации работы очередей. Для устранения данного

недостатка формализуем задачу планировщика пакетов в терминах теории дискретно-событийных систем.

Гибридный алгоритм планировщика подразумевает наличие одной очереди, при появлении в которой пакеты сразу же начинают обслуживаться, т.е. пакеты не буферизируются, а сразу же передаются. Условно можно считать, что буфер в одной из очередей отсутствует. Исходя из того, что модель работы планировщика с взвешенным обслуживанием очередей составлена в соответствии с приоритетом трафика в ней, то ее модификация заключается в обнулении размера буферного пространства для первой очереди. Временно-событийный граф работы этой модели представлен на рисунке 3.4.



- $t_1$ - моменты времен поступления пакетов для приоритетного обслуживания;
- $t_2$ - моменты времен поступления пакетов в сеть;
- $q_1$ - время, за которое пакеты могут поступить в приоритетную очередь;
- $e_1$ - время обслуживания пакетов приоритетной очереди ;
- $t_4, t_7$ - моменты времен поступления пакетов в 1-ю и 2-ю очереди соответственно;
- $t_5, t_8$ - моменты времен поступления пакетов в буферы 1 и 2-й очередей соответственно;
- $t_3, t_6$ - моменты времен освобождения 1 и 2 очередей соответственно;
- $N_1, N_2$ - емкость буферов 1 и 2 очереди;
- $q_2, q_3$ - время, за которое пакеты поступает в 1 и 2-ю очереди соответственно;
- $e_2, e_3$ - время обслуживания пакетов 1 и 2-й очередей соответственно;
- $u_1$ - управляющие воздействия;
- $S_i$ - события, формирующие процесс работы планировщика.

Рисунок 3.4 – Временно-событийный граф работы планировщика с гибридным обслуживанием очередей с несколькими управляемыми переходами

На вход планировщика от классификатора поступают пакеты. Для первой очереди, через время  $q_1$ , пакеты поступают на обслуживание. Через время  $e_1$  пакеты первой очереди поступают в выходной интерфейс для передачи в сеть. Для оставшихся двух очередей, через время  $q_2, q_3$ , после освобождения первой очереди, пакеты помещаются в соответствующие буферы емкостью  $N_1, N_2$ . По мере формирования управляющих воздействий  $u_1, u_2$ , пакеты извлекаются из буферов и обслуживаются с временами обслуживания  $e_2, e_3$ . По мере поступления управляющих воздействий  $(u_3, u_4, u_5)$  пакет поступает в сеть, а планировщик начинает обслуживать следующую очередь.

Моменты  $k$ -х запусков  $t_i$  переходов соответствуют переменным  $x_i(k)$ . Тогда уравнения срабатывания переходов будут иметь следующий вид, (3.29):

$$\begin{aligned}
 x_1(k+1) &= x_2(k+1) \oplus q_1 \cdot x_8(k+1), \\
 x_2(k+1) &= x_1(k+1) \oplus e_1 \cdot u_3(k+1), \\
 x_3(k+1) &= x_4(k - N_1 + 1) \oplus q_2 \cdot x_2(k+1) \\
 x_4(k+1) &= x_3(k+1) \oplus u_1(k+1), \\
 x_5(k+1) &= x_4(k+1) \oplus e_2 \cdot u_4(k+1), \\
 x_6(k+1) &= x_7(k - N_2 + 1) \oplus q_3 \cdot x_5(k+1), \\
 x_7(k+1) &= x_6(k+1) \oplus u_2(k+1), \\
 x_8(k+1) &= x_7(k+1) \oplus e_3 \cdot u_5(k+1).
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

Или в матрично-векторной форме:

$$\begin{aligned}
x(k+1) = & \underbrace{\begin{pmatrix} \varepsilon & e & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & q_1 \\ e & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & q_2 & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & e & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & e & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & q_3 & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & e & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & e & \varepsilon \end{pmatrix}}_{=A_0} \cdot x(k+1) \oplus \dots \oplus \underbrace{\begin{pmatrix} \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & e & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \end{pmatrix}}_{=A_{N_1}} \times \\
& \times x(k - N_1 + 1) \oplus \underbrace{\begin{pmatrix} \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & e & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \end{pmatrix}}_{=A_{N_2}} \cdot x(k - N_2 + 1) \oplus \underbrace{\begin{pmatrix} \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ e_1 & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ e & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & e_2 & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & e & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & e_3 \end{pmatrix}}_{=B} \cdot u(k+1),
\end{aligned}$$

где  $x(k) = (x_1(k) \ x_2(k) \ x_3(k) \ x_4(k) \ x_5(k) \ x_6(k) \ x_7(k) \ x_8(k))^T$ , а все матрицы  $A_i = N$ ,  $i = \overline{2, N_l - 1}$ ,  $l = 1, \dots, 7$ .

Если считать, что буферы для каждой из очередей равны, то выражение упроститься. Перепишем (3.29) в явном виде и для удобства представления разделим вектора управления на два различных следующим образом  $(u(k+1), u_1(k+1))$ , (3.30):

$$x(k+1) = A_0^* \cdot \begin{bmatrix} A_1 \cdot x(k) \oplus A_2 \cdot x(k-1) \oplus A_3 \cdot x(k-2) \oplus A_4 \cdot x(k-3) \oplus \\ \oplus A_5 \cdot x(k-4) \oplus \oplus A_6 \cdot x(k-5) \oplus B_0 \cdot u(k+1) \oplus \\ \oplus B_1 \cdot u_1(k+1) \end{bmatrix}. \quad (3.30)$$

Введем обозначения:  $\tilde{x}(k) = (x(k)^T \ x(k-1)^T \ \dots \ x(k-N_q+1)^T)^T$ ,  
 $\tilde{u}(k) = u(k+1)$ ,  $\tilde{u}_1(k) = u_1(k+1)$  для  $N_i = 3$ , тогда из (3.30), (3.31):

$$\begin{pmatrix} x(k+1) \\ x(k) \\ x(k-1) \\ x(k-2) \\ x(k-3) \\ x(k-4) \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \bar{A}_1 & N & N & N & N & N \\ N & \bar{A}_2 & N & N & N & N \\ N & N & \bar{A}_{N_1} & N & N & N \\ N & N & N & \bar{A}_4 & N & N \\ N & N & N & N & \bar{A}_5 & N \\ N & N & N & N & N & \bar{A}_{N_2} \end{pmatrix}}_{=A} \cdot \begin{pmatrix} x(k) \\ x(k-1) \\ x(k-2) \\ x(k-3) \\ x(k-4) \\ x(k-5) \end{pmatrix} \oplus \underbrace{\begin{pmatrix} \bar{B}_0 \\ N \\ N \\ N \\ N \\ N \end{pmatrix}}_{=B_0} \cdot \tilde{u}(k) \oplus \underbrace{\begin{pmatrix} \bar{B}_1 \\ N \\ N \\ N \\ N \\ N \end{pmatrix}}_{=B_1} \cdot \tilde{u}_1(k). \quad (3.31)$$

Выражение (3.31) в пространстве состояний имеет вид, (3.32):

$$\tilde{x}(k+1) = A \cdot \tilde{x}(k) \oplus B_0 \cdot u(k) \oplus B_1 \cdot u_1(k). \quad (3.32)$$

Работа модели представлена на диаграмме Ганта (рисунок 3.5).

На диаграмме представлены времена срабатывания переходов, соответствующих временам поступления пакетов в очередь  $(x_1, x_4, x_7)$ , временам поступления управляющих воздействий  $(u)$ , временам начала обслуживания пакетов каждой из очередей  $(x_3, x_5, x_8)$ . Исходя из представленных зависимостей можно сделать вывод о непротиворечивости

представленной модели процессу работы планировщика с гибридным обслуживанием очередей.

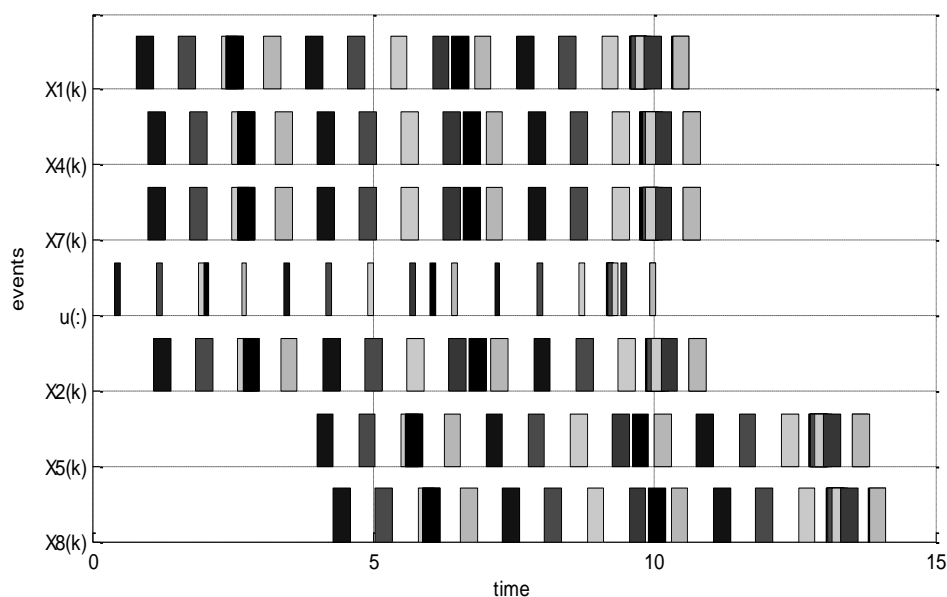


Рисунок 3.5 – Диаграмма Ганта процесса работы планировщика с гибридным обслуживанием 3-х очередей

Вектор  $e$ , характеризующий время, затрачиваемое на обслуживание, вносит некоторую величину задержки в ее значение «из конца-в-конец» и фактически «замедляет» поток. А вектор управления «корректирует» эти задержки. Т.о., решив обратную задачу можно найти вектор необходимых корректировок для получения оптимального решения согласно (3.32). Введем следующую переменную:

$$W = A \cdot \tilde{x}(k) \oplus B_0 \cdot u(k), \quad (3.33)$$

тогда (3.32) переписывается в

$$\tilde{x}(k+1) = W \oplus B_1 \cdot u_1(k). \quad (3.34)$$

Решая уравнение (3.34) относительно  $W$  можно получить две оценки:

- точную, если  $W < \tilde{x}(k+1)$ , то  $B_1 \cdot u_1(k) = \tilde{x}(k+1)$ ;

$$u_1(k) = B_1^{-T} \cdot \tilde{x}(k+1); \quad (3.35)$$

– грубую,  $W = \tilde{x}(k+1)$ , то  $B_1 \cdot u_1(k) \leq \tilde{x}(k+1)$ ; вектор корректировок вычисляется согласно (3.35).

С целью оценки эффективности предложенных математических моделей проведено моделирование, результаты которого приведены на рисунке 3.6

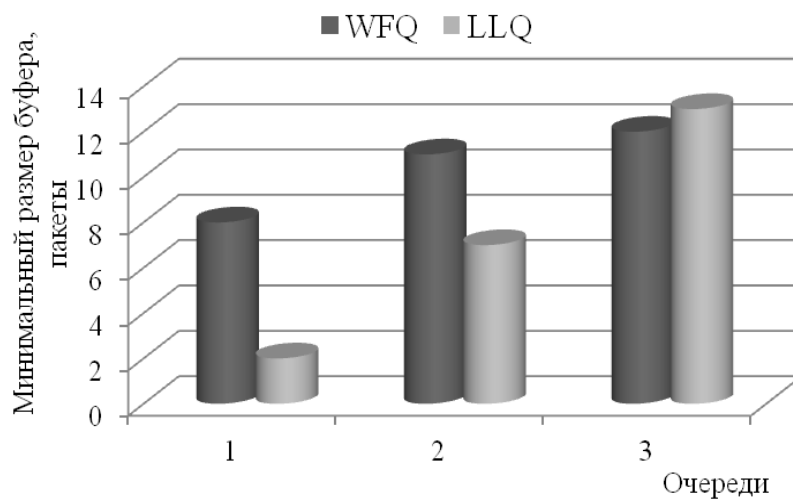


Рисунок 3.6 – Минимальный размер буфера

Согласно зависимостям, представленным на рисунке 3.5, можно сделать, что для случая LLQ, при этом первая очередь – приоритетная, размер буфера минимальный. Таким образом, предложенный метод для прогнозирования вносимых задержек будет наиболее точным. Его точность, по сравнению, с планировщиком со взвешенным обслуживанием, составляет до 10,8%.

### 3.4 Разработка комплексного показателя качества работы транспортной сети МОС

Как упомянуто в пп. 1.5 для получения общей оценки разнородных критериев эффективности, необходим переход к относительным значениям. Это осуществимо следующим образом: определение весов, составляющих в общем критерии, разработка функций полезности для оператора связи и нахождение оптимальных решений. Так как определение весов, составляющих в общем критерии, является частным случаем функций полезности, а нахождение оптимальных решений придется производить всякий раз, при изменении исходных условий, то остановимся на разработке функций полезности предоставления ресурсов оператором связи.

#### 3.4.1 Обоснование функций полезности предоставления ресурсов оператором связи

Для того, чтобы разработать функции полезности предоставления ресурсов оператором связи, например, для магистрального канала, зададимся основными параметрами контроля при заданных характеристиках качества работы. Например, насколько для оператора связи будет критичным использование канала, загруженного на 90% или при каком уровне загрузки магистрального канала, необходимо осуществлять подключение нового? Ответ, на самом деле не так очевиден. Это связано, в первую очередь, с параметрами качества обслуживания, которые необходимо поддерживать при передаче по магистральному каналу, их разнородности и зависимости друг от друга. Так, обеспечение определенного уровня задержки, вызывает необходимость в выделении определенного ресурса для обслуживания очередей в буферах устройств. Обеспечение необходимого уровня потерь достигается за счет увеличения пропускной способности выделяемого ресурса по установлению виртуального канала. Чем больше выделяется



ресурса под установление виртуального канала, тем меньше можно таких каналов организовать в физическом, а, с учетом задержки, скорость в таком канале уменьшается. Все перечисленные факторы приводят к неэффективному использованию ресурсов и потерей заработков для оператора связи.

Влияние различных параметров QoS (задержка, джиттер, потеря пакетов и ограничение пропускной способности) на различные услуги широко изучалось. В результате этого исследования выяснилось, что используются в основном пороговые значения: определяются только два порога. При этом, рассматриваются случаи, если параметр находится либо внутри области определения, либо вне. Однако, различные вариации параметров между пороговыми значениями также имеют существенное значение влияние на мультимедийные услуги.

Для обеспечения лучшей модели свойств мультимедийных потоков введем функции полезности. Функции полезности можно определить, как для пользователя, так и для оператора, с точки зрения использования ресурса и его стоимости делятся на два типа: функции полезности, отображающие влияние конкретных параметров QoS на восприятие пользователя (представляют полезность между пороговыми значениями, а также изменение полезности в точках перехода) и функции полезности приложения [95]. Последние вводятся для оценки взаимодействия с пользователем на основе анализа результатов функций полезности нарушения работы подсети.

Кроме того, оператору связи необходимо оценить каждую единицу предоставляемого ресурса. При этом, явным образом можно дать стоимостную оценку только определенным видам ресурсов. Для того, чтобы определить стоимостную оценку остальных ресурсов можно ввести функции полезности ресурсов оператора связи.

Традиционные параметры QoS могут быть легко определены с помощью числовых функций полезности, тогда как другие, такие как видеокодек и качество изображения, часто подходящим образом выражаются

нечисловым и неоднородным образом. Рассмотрим механизм отображения между пространством качества и пространством числовой оценки полезности для измерений QoS, которые не подходят для моделирования исключительно математической функцией.

Представленные ниже пороговые значения для приложений VoIP, потокового видео и онлайн-игр основаны на исследованиях пользователей, приведены в таблице 3.1 [96].

Минимальный порог определяет значение, при превышении которого пользователь столкнется с определенными нарушениями сети. Предполагается, что взаимодействие с пользователем будет неприемлемым при достижении максимального порога.

Таблица 3.1 – Пороги приложений, определенные эмпирическим путем

Приложение/параметр QoS		VoIP	Видеостриминг	Видеоигры онлайн
Задержка, мс	min	100	200	50
	max	150	1000	150
Уровень потерь	min	0,01	0,0001	0,015
	max	0,03	0,01	0,035

В таблице 3.1 не указаны пороговые значения пропускной способности, поскольку они определяются скоростью кодирования или частотой кадров приложения.

VoIP – популярная услуга в IP-сети. К приложениям этой услуги относятся, помимо передачи речи, сетевое радио и голосовые сообщения. Передача голосовых услуг наиболее уязвима к задержкам, джиттеру и потерям, чем другие неинтерактивные голосовые услуги. Для пользователей с высокими требованиями к интерактивности, представим следующую общую функцию полезности для аудиопотоков. Функция имеет три области отражающих средний уровень терпимости человека к искажениям, (3.36).

$$U_{VolP}(d) = \begin{cases} 100 - \gamma_1 d, & d < c_1 \\ b_1 \tanh(\beta(\chi - b_2)) + b_3, & c_1 \leq d \leq c_2, \\ \delta - \gamma_2 d, & \chi > c_2 \end{cases} \quad (3.36)$$

где,  $d$  – оценка задержки;

$\gamma_1, b_1, \gamma_2$  – коэффициенты отражающие свойства ухудшения качества в каждой области

$c_1, c_2$  – нижний порог (граница первой области и второй области) и верхний порог (граница второй и третьей области) приложения соответственно;

$b_1, b_2, b_3$  – параметры настройки для обеспечения непрерывности между областями.

Подставляя эмпирические значения из таблицы 3.1, перепишем (3.36) в следующий вид, (3.37):

$$U_{VolP}(d) = \begin{cases} 100 - 0,067 \cdot d, & d < 150 \\ -25 \cdot \tanh(0,04 \cdot (d - 205)) + 65, & 150 \leq d \leq 300. \\ 45,5 - 0,016 \cdot d, & d > 300 \end{cases} \quad (3.37)$$

Подставляя численные значения в приведенное выражение, получим графическую зависимость функции утилизации от величины задержки (рисунок 3.7).

Во время голосового разговора потеря одного пакета может сделать слово неузнаваемым, а отдельное слово может быть ключевым словом для всего предложения.

Согласно этому можно выразить общую функцию полезности для потери пакетов как, (3.38):

$$U_{VolP}(Pl) = b_1 + b_2 \cdot \ln(b_3 + \beta \cdot Pl), \quad (3.38)$$

где  $Pl$  – текущий уровень потерь;

$\beta$  – крутизна ухудшения качества при увеличении потери пакетов.

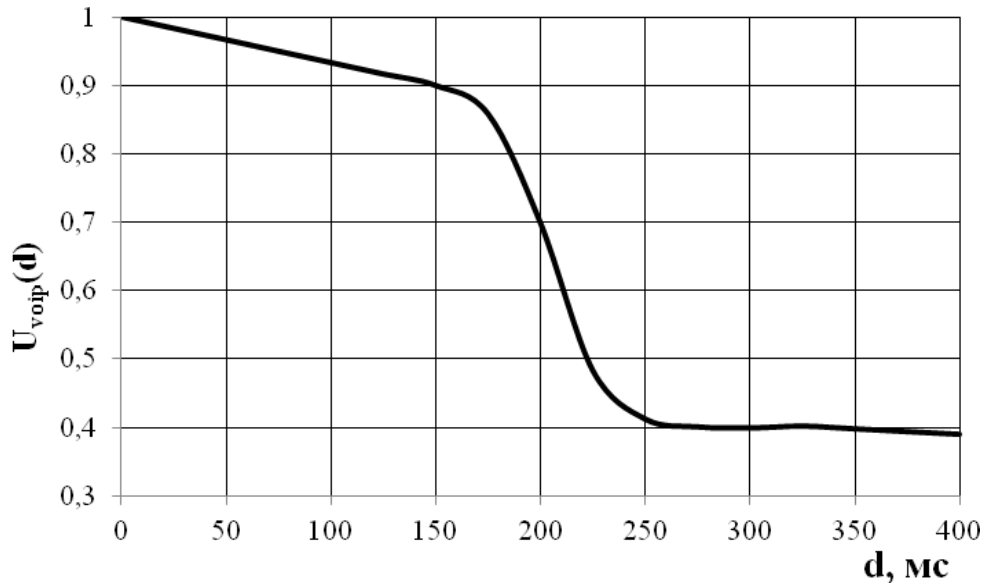


Рисунок 3.7 – График функции полезности  $U_{voip}(d)$

Подставляя значения из таблицы 3.1, получим следующую численную зависимость от значения вероятности потерь для трафика приложения VoIP, (3.39):

$$U_{voip}(Pl) = 882 - 200 \cdot \ln(50 + 3 \cdot Pl). \quad (3.39)$$

Подставляя численные значения в приведенное выражение, получаем графическую зависимость функции утилизации от величины уровня потерь (рисунок 3.8).

Для трафика VoIP качество обслуживания зависит от типа используемого кодека, поэтому при снижении минимально допустимой пропускной способности работа кодека останавливается и качество речи сильно ухудшается.

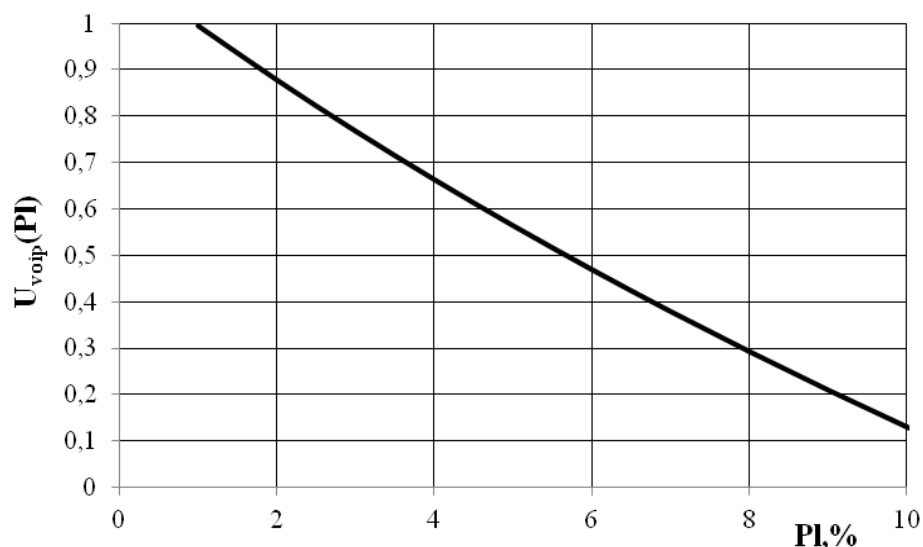


Рисунок 3.8 – График функции полезности  $U_{voip}(PI)$

Следовательно, функция полезности  $U_{voip}(B)$  от величины пропускной способности будет иметь вид (рисунок 3.9), (3.40):

$$U_{voip}(B) = \frac{\text{sgn}(B - B_{\min}) + 1}{2}, \quad (3.40)$$

где  $B_{\min}$  – минимально допустимая пропускная способность для заданного кодека.

Согласно общим характеристикам мультимедийных потоков, выражение общих функций полезности для VoIP могут использоваться для моделирования приложений потокового видео. Выражение (3.36) определяет функцию полезности задержки интерактивного видеопотока с порогами задержки 200 мс и 1 с, (3.41):

$$U_{video}(d) = \begin{cases} 100 - 0,004 \cdot d, & d < 200 \\ -25 \cdot \tanh((d - 625) / 200) + 75, & 200 \leq d \leq 1000 \\ 57 - 0,006 \cdot d, & d > 1000 \end{cases} \quad (3.41)$$

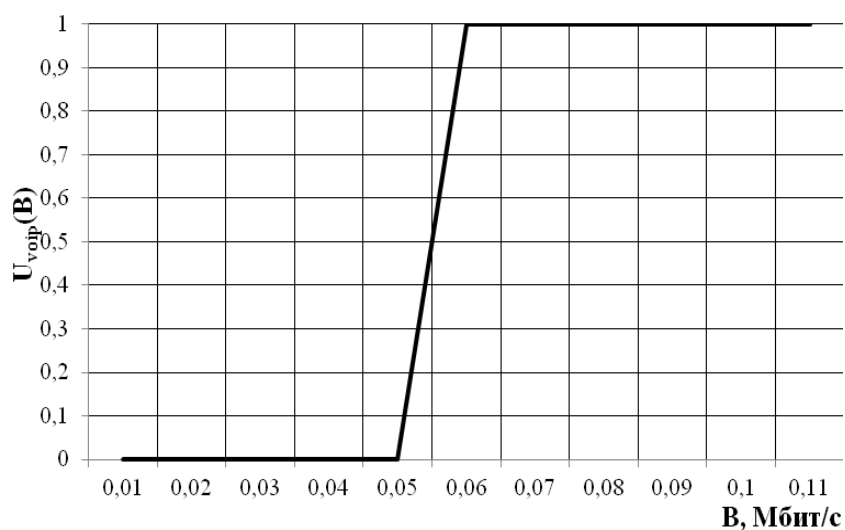


Рисунок 3.9 – График функции полезности  $U_{voip}(B)$

Для вероятности потерь функция полезности выглядит следующим образом (рисунок 3.10):

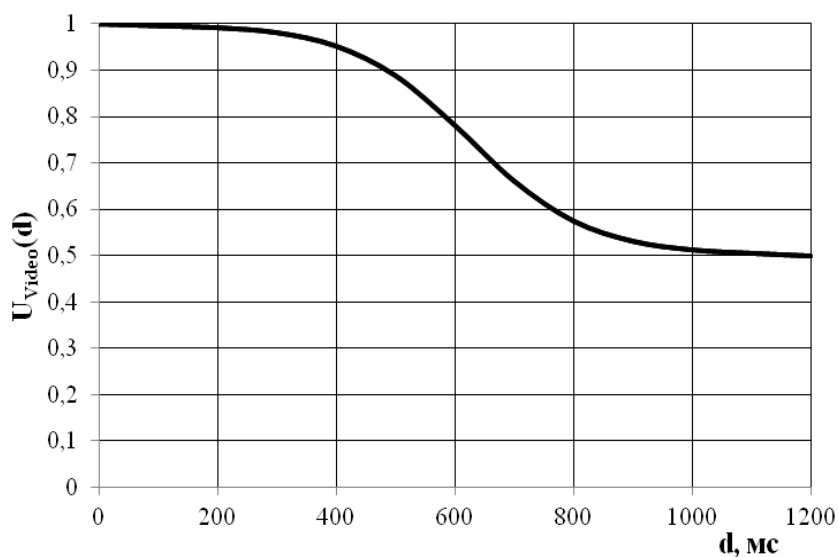


Рисунок 3.10 – График функции полезности  $U_{video}(d)$

Аналогично функции полезности для VoIP и, используя данные таблицы 3.1, функция полезности уровня потерь для видеопотока имеет вид, (3.42):

$$U_{video}(Pl) = 250 + 50 \cdot \ln(20 + 12,5 \cdot Pl). \quad (3.42)$$

Функция полезности, в зависимости от величины пропускной способности, имеет следующий вид, (3.43)

$$U_{Video}(B) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right) \cdot e^{-r \cdot B}}, \quad (3.43)$$

$$r = \frac{2 \ln\left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)}{B_{\max}}, \quad (3.44)$$

$$\varepsilon = \frac{B_{\min}}{B_{\max}}. \quad (3.45)$$

где  $B_{\min}$  – минимально допустимая пропускная способность;

$B_{\max}$  – необходимая максимальная пропускная способность.

Благодаря изменениям стратегии игры для пользователя: «Стратегия в реальном времени» и «Шутер от первого лица» изменяются требования, предоставляемые конечными пользователями к задержке и времени отклика сети. Так, для второй стратегии предъявляются повышенные требования к времени отклика сети. Следовательно, именно на требования второй стратегии будут критериями принятия решений для формирования функций полезности. Задержка сильно влияет на производительность пользователя в онлайн-играх, особенно в играх типа «Шутер от первого лица». Из-за сильной чувствительности геймеров к сетевой задержке для моделирования подходит гиперболический тангенс (без расширенных переходов), (3.46) – (3.48).

$$U_{Game}(d) = -45 \cdot \tanh(0,015 \cdot d - 1,35) + 60, \quad (3.46)$$

$$U_{Game}(Pl) = 100 - 50 \cdot \ln(1 + p_l), \quad (3.47)$$

$$U_{BFT}(B) = \frac{\log(B+1)}{\log(B_{\max}+1)}. \quad (3.48)$$

Вышепредставленные функции полезности позволяют задавать критерий использования соответствующего ресурса конечным пользователем. Кроме данных оценок, необходимо определить в какой мере, при исходных данных, сеть будет производительна для МОС.

### 3.4.2 Разработка комплексного показателя оценок качества работы транспортной сети МОС

Относительность значений, представленных в пп. 3.5.1, функций «полезности» позволяет переходить к безразмерным оценкам параметров качества обслуживания. Это позволяет учитывать разнотипные показатели в рамках единого критерия. Для любого типа трафика можно сформировать составной показатель качества обслуживания либо составную функцию полезности для определенного типа трафика.

Из-за разнородности оцениваемых критериев качества работы транспортной сети МОС предложено использовать комплексный показатель, содержащий две составляющие: композитную функцию полезности и функцию производительности (3.49):

$$U = U_{QoS} \cdot U_{prf}, \quad (3.49)$$

$$U_{QoS} = U_B(B) \cdot U_D(D) \cdot U_{Pl}(Pl), \quad (3.50)$$

$$U_{prf} = R \cdot Utl, \quad (3.51)$$

где  $U_{QoS}$  – композитная функция полезности;

$U_{ef}$  – функция производительности;

$U_B(B), U_D(D), U_{Pl}(Pl)$  – функции «полезности» для пропускной способности, задержки, вероятности потерь соответственно;

$Utl$  – оценка эффективности работы сети, в зависимости от утилизации канала;

$R$  – оценка надежности транспортной сети.



Для (3.48) действуют следующие выражения и ограничения:

$$\begin{aligned} U_B(B) &\rightarrow 1, \text{ при } B \leq B_{\max}; \\ U_D(D) &\rightarrow 1, \text{ при } D < D_{\text{доп}}; \\ U_{Pl}(Pl) &\rightarrow 1, \text{ при } Pl < Pl_{\text{доп}}. \end{aligned} \quad (3.52)$$

Для (3.51) принимаются следующие ограничения: при загрузке канала до 80% ( $Util \leq 0,8$ ) эффективность его работы для транспортной сети МОС возрастает. При загрузке канала выше 80% ( $Util > 0,8$ ) эффективность его работы уменьшается почти до нуля, т.к. канал перегружен и перестает работать.

В (3.52) допустимые и максимальные значения выбираются согласно технологии используемой МОС.

Выражение (3.49) будет принимать максимальное значение «единица», если все параметры QoS удовлетворяют требованиям для этой услуги в полной мере. Если хотя бы один из параметров полностью не удовлетворен, то критерий принимает нулевое значение. Для того, чтобы избежать ситуации, когда все наборы будут нулевыми, необходимо сортировать параметры качества обслуживания по важности для каждого класса услуг (чем важнее услуга, тем меньше ее номер). Это позволяет пренебречь малозначащими показателями QoS. Кроме того, комплексный критерий учитывает нелинейную чувствительность трафика определенной услуги к параметрам QoS.

### 3.5 Разработка функциональной схемы гибридного метода прогнозирования качества работы транспортной сети

При подключении к базовой станции, терминальное оборудование производит анализ уровня получаемого сигнала. В таком случае транспортная сеть МОС получает дополнительную нагрузку без учета оценок

качества эффективности работы. Чтобы учесть вышеперечисленное, обоснуем гибридный метод прогнозирования оценок качества работы транспортной сети МОС. Метод прогнозирования включает в себя основные процедуры, показывающие следующую функциональную зависимость [97]:

- 1) сбор, обработка и прогнозирование трафика участка транспортной сети базовой станции;
- 2) прогнозирование ресурсов, которые необходимо выделить для качественного обслуживания;
- 3) разработка основных оценок качества работы транспортной сети оператора мобильной связи;
- 4) прогнозирование оценок качества работы участка транспортной сети оператора, в зависимости от количества подключаемых пользователей.

Представленные процедуры основаны на математических моделях, представленных в пп. 3.1-3.4. Каждая процедура, выполняет свою функцию в общем гибридном методе прогнозирования. На основе этих процедур синтезирована имитационная модель, которая описана в следующем разделе диссертационной работы.

### 3.6 Выводы по разделу 3

Подключение мобильного терминала к базовому оборудованию основано на определении наилучшего значения уровня принимаемого сигнала от базовой станции. В таком случае транспортная сеть МОС получает дополнительную нагрузку без учета оценок качества эффективности работы. На основе математических моделей, предложенных в предыдущем разделе, чтобы учесть эффективность работы транспортной сети МОС при подключении любого нового мобильного терминала к базовому оборудованию, в разделе предложен и обоснован гибридный метод прогнозирования оценок качества работы транспортной сети МОС.

В пп. 3.1 представлена блок-схема гибридного метода прогнозирования. Функционально каждый из блоков представляет следующее:

- метод оценки объема выделяемой пропускной способности;
- метод прогнозирования оценки надежности транспортной сети;
- метод прогнозирования оценки размера буфера контроллера базовой станции.

В пп. 3.1 показано, что метод оценки пропускной способности транспортного канала связи от средней скорости подключения, основанный на эмпирических данных не позволяет прогнозировать эффективность работы транспортной сети МОС. Для этого в разделе введен дополнительный показатель, утилизация транспортного канала, и показано, что при обеспечении требуемых параметров QoS, каналы транспортной сети будут недогружены.

В пп. 3.3 представлен метод прогнозирования оценки надежности транспортной сети МОС. В качестве основного показателя надежности рассматривается вероятность потери целостности информации и ненулевого достижимого уровня целостности информации и получено формульное выражение для его определения.

В пп. 3.4 предположен метод оценки размера буфера контроллера базовой станции с обеспечением параметров качества обслуживания. Метод основан на использовании модели планировщика в терминах идемпотентной алгебры. Кроме того, формализована задача об эффективном использовании канальных ресурсов и поставлены требования по качеству обслуживания. В качестве базовой, используется модель планировщика с гибридным обслуживанием очередей. Для нее представлена дискретно-событийная модель, позволяющая наиболее точно отобразить динамику работы планировщика, представлена соответствующая диаграмма Ганта. На основе предложенной модели представлен метод расчета размера буфера для каждой из очередей планировщика. Оценка размера буфера показала, что она

составляет до 13 пакетов при обеспечении требуемых показателей качества обслуживания. Для расчета этой оценки использовать модель с гибридным обслуживанием, что показало уменьшение объема буфера. Следовательно, точность модели, по сравнению, с планировщиком со взвешенным обслуживанием, составляет до 10,8%. Таким образом, впервые разработана дискретно-событийная модель работы планировщика в базисе Max-Plus алгебры, учитывающая задержки на обработку запросов и позволяющая формализовать процесс управления очередями в пространстве состояний.

В п.3.5 разработаны требования к критериям оценок качества работы транспортной сети. Так, обоснован переход к относительным значениям. Это осуществимо следующим образом: определение весов, составляющих общий критерий, разработка функций полезности для оператора связи и нахождение оптимальных решений. Для этого впервые было предложено использование функций «полезности» для решения задач прогнозирования. В пп. 3.5.1 описаны функции «полезности» основных видов трафика для основных параметров качества обслуживания. Так, относительность значений, предложенных в пп. 3.5.1, функций «полезности» позволяет переходить к безразмерным оценкам параметров качества обслуживания, что позволит учесть разнотипные показатели в рамках единого критерия. Для любого типа трафика можно сформировать составной показатель качества обслуживания либо составную функцию полезности для определенного типа трафика. В пп. 3.5.2 сформирован комплексный показатель эффективности работы транспортной сети МОС, состоящий из композитной функции полезности и функции производительности. К ним выдвинуты соответствующие ограничения, которые зависят от используемой в МОС технологии. Таким образом, обоснованы требования к формированию комплексного показателя эффективности работы сети, учитывающего различные оценки на основе функций полезности.

Рассматриваемые в разделе вопросы опубликованы в научных работах соискателя [98, 99].

**РАЗДЕЛ 4****МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ПРЕДЛОЖЕННОГО МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ.  
РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ЕГО ПРАКТИЧЕСКОМУ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЮ**

В настоящем разделе представлено описание логики работы метода гибридного прогнозирования, имитационной модели предложенного гибридного метода прогнозирования, а также экспериментальные данные, на основе которых сделаны основные выводы.

**4.1 Синтез имитационной модели предложенного метода**

Для проверки работоспособности и адекватности предложенных моделей синтезируем имитационную модель, сущность которой раскрывается соответствующей блок-схемой алгоритма в Приложении А.

Работа имитационной модели состоит в следующем. Для экспериментального оценивания комплексного показателя разработано программное обеспечение, выполняющее этапы моделирования, согласно пп. 3.5. Для прогнозирования оценок качества работы транспортной сети оператора мобильной связи, в базовой станции внедрены следующие методы и средства:

- функция `agreg`, реализующая агрегацию поступающего трафика;
- функция `wrk_algaub`, реализующая функционирование аналитического алгоритма;
- функция `PrognozErr`, реализующая алгоритм моделирования оценок прогнозирования;
- функции `wrk_alMod`, `arFIma` и `ModInt` реализующие, алгоритмы прогнозирования трафика;

– функции LLQ\_TEG1, WFQ\_TEG реализующие работу планировщиков очередей. Программная реализация представлена в Приложении Б.

На первом этапе формируются исходные данные. Модель исходных потоков трафика задается последовательностями  $t_i(k)$ ,  $i=1,2,3,4,5$ . В контроллер базовой станции поступает поток данных  $S(t)$ . Затем, на основе обработанных данных  $c_j(m\Delta\tau)$ , они классифицируются и распределяются по очередям. Система очередей организована таким образом, что каждая очередь обслуживает трафик определенного класса  $S_n(i)$ . Для каждой очереди, в контроллере базовой станции организован буфер,  $d_j^{q*}$ , размер которого, в зависимости от требуемых параметров QoS, может изменяться. На основе (3.35) определяется необходимый размер буфера или максимальную величину задержки, вносимую контроллером. На выходных портах базовой станции формируется единый поток данных, который передается в транспортную сеть МОС.

Пусть, атрибуты каждого потока фиксируются и обрабатываются специализированным блоком, предназначенным для сбора и обработки текущей информации. Данный блок выполняет статистический сбор данных. Здесь происходит первичная обработка данных, а именно агрегация трафика и его прогнозирования. Здесь формируются последовательности значений  $c_j^q(i\Delta t_s)$  и оцениваются параметры качества обслуживания,  $d_j^q$ , исходя из возможностей канала транспортной сети. Для рассматриваемого случая, к параметрам качества обслуживания относятся оценки текущих значений задержек по каждому из потоков. На основании этих данных производится оценка объема выделяемой пропускной способности. Для этого, по полученным статистическим данным производится оценка интервалов статистики (интервалов прогноза), регулирования и, исходя из представленных в пп. 2.2 прогнозных математических моделей, определяются оценки объема выделяемой пропускной способности,  $b_j(m\Delta\tau)$ .

На основе полученных значений производится проверка требований по качеству обслуживания. К данным параметрам относятся: задержка при передаче пакета и уровень потерь пакетов. Если таковые удовлетворяют требуемым значениям, то происходит расчет оценок эффективности работы транспортной сети: величина утилизации каналов связи и оценка надежности транспортной сети. На основании полученных параметров находятся функциональные зависимости функций «полезности» от величины пропускной способности, задержки и вероятности потерь.

После нахождения этих величин происходит построение зависимости последних от типа поступающего трафика и количества подключаемых пользователей. Данная зависимость, затем, используется для сравнения количества подключаемых абонентов, с требуемой минимальной скоростью подключения при обеспечении необходимых параметров обслуживания и оценки эффективности подключения нового абонента, создающего нагрузку на исследуемую транспортную сеть МОС.

В случае несоответствия рассчитанных параметров качества обслуживания заданным, происходит корректировка скорости поступающего трафика путем управления размером буфера контроллера базовой станции. После этого, описанный выше расчет происходит заново.

## 4.2 Экспериментальная оценка предложенного гибридного метода прогнозирования

### 4.2.1 Сбор и обработка данных для моделирования

В качестве исследуемого трафика использовалась последовательность данных, собираемая в течение месяца с периодичностью в 1 минуту. Для выбранной последовательности проведен анализ на самоподобность [100, 101]. Выявлено, что она обладает свойствами медленно убывающей зависимости с коэффициентом Херста равным 0,85. На основе анализа

высказано предположение о том, что последовательность обладает «краткосрочной памятью». Это дает возможность для ее прогнозирования.

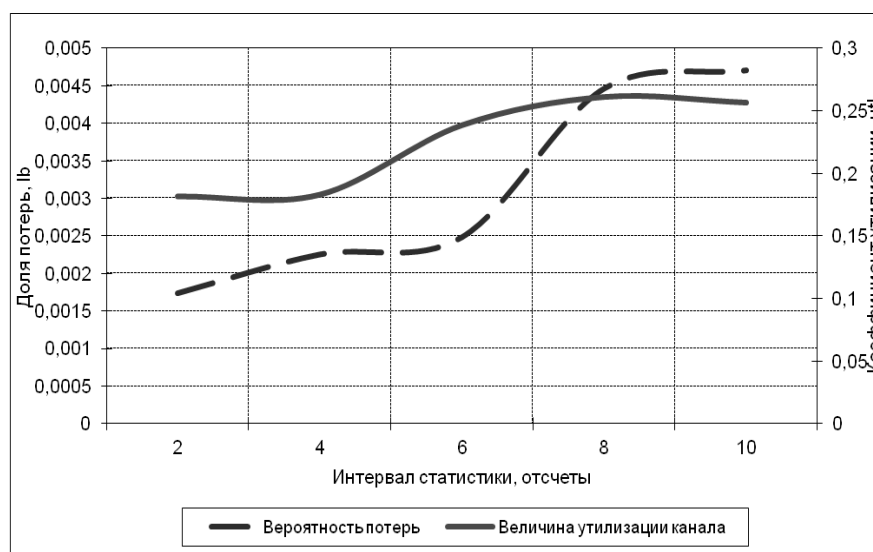


Рисунок 4.1 – Функциональная зависимость оцениваемых параметров от изменения величины интервала статистики (постоянная величина интервала перераспределения)



Рисунок 4.2 – Функциональная зависимость оцениваемых параметров от изменения величины интервала перераспределения (постоянная величина интервала статистики)



Согласно (2.23) и (2.24) получены функциональные зависимости показателя качества обслуживания и утилизации канала соответствующей пропускной способности с различными параметрами интервалов статистики и перераспределения (рисунки 4.1-4.2).

Величина утилизации канала оценивается исходя из отношения пропускных способностей предоставляемой транспортной сетью и физического канала. Данная величина постоянна всего времени предоставления канала. Время предоставления канала в среднем занимает 3 минуты. Для оценки размеров интервалов статистики и регулирования, соответствующим требуемым параметрам качества обслуживания (вероятность потерь) и эффективности работы алгоритма (утилизация канала) используется канал, обеспечивающий скорость передачи до 50 Мбит/с.

Временные единицы выражены в условных значениях, отсчетах.

Для пакетных сетей передачи данных, для голосового трафика величина вероятности потерь не должна превышать 0,25%. Величина утилизации канала при этом должна составляет не более 60%, при пиковом до 35%.

Согласно полученным зависимостям, величина интервала статистики, удовлетворяющая необходимым значениям вероятности потерь и утилизации канала составляет не менее 6 отсчетов, при фиксированной величине интервала регулирования (не менее 20 отсчетов). А величина интервала перераспределения – 10, при фиксированном размере интервала статистики в 2 отсчета. Т.о., чем чаще снимается статистика, тем точнее прогнозирование, согласно алгоритму. Однако, стоит заметить, что увеличение размера интервала перераспределения может привести к увеличению размера ошибки прогнозирования.

#### 4.2.2 Экспериментальное оценивание величины вероятности нарушения целостности передаваемых данных

Основные предпосылки для экспериментальных данных приведены в пп. 3.2. Уровень вероятности потери целостности информации зафиксирован в  $\theta = 1$  Бит/с/Гц. Для моделирования использовался блок, размером в  $S = 64$  символа и с двоичной фазовой манипуляцией (BPSK).

Для изучения влияния степени взаимодействия совместной передачи и надежности транспортной сети, исследовалась производительность сети с различными параметрами.

Параметры сети следующие: количество малых сот  $M_s = 3$ ; уровень получаемого сигнала  $s = 0,998$ ; выборочные средние для количества промежуточных соединителей, дополнительных прослушивающих устройств, устройств создающих помехи и устройств получателей услуг соответственно  $\{m_R, m_E, m_J, m_D\} = \{2, 2, 2, 3\}$  и соответствующие выборочные среднеквадратичные отклонения величин количества промежуточных соединителей, дополнительных прослушивающих устройств и устройств создающих помехи  $\{\theta_R, \theta_E, \theta_J\} = \{10, 10, 10\}$  дБ.

Результаты моделирования представлены на рисунке 4.3. На рисунке «Sim» представляет результаты моделирования, согласно предложенному алгоритму. «Ana» представляет аналитические результаты, а «Asy» представляет результаты асимптотического анализа.

Количество промежуточных соединителей и устройств, прослушивающих исходный сигнал, влияет на вероятность нарушения целостности информации. В частности, при  $n = 1$ , вероятность нарушения целостности информации уменьшается при увеличении количества промежуточных соединителей, достигая, таким образом, лучшей эффективности работы сети.

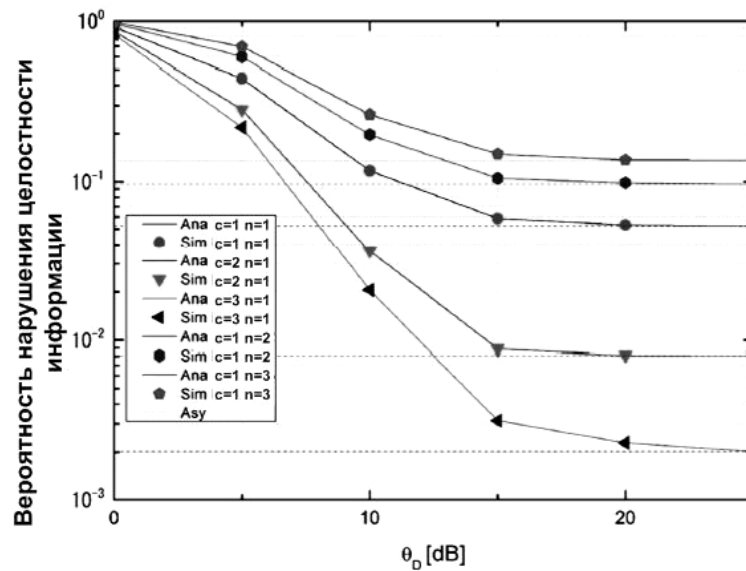


Рисунок 4.3 – Зависимость вероятности нарушения целостности информации для различных  $c, n$  от целевого уровня секретности

И, наоборот, при  $c=1$ , вероятность нарушения целостности информации увеличивается, если увеличивается количество устройств, прослушивающих исходный сигнал. Также можно отметить, что результаты приближаются к асимптотическим результатам в режиме высокого уровня отношения сигнал/шум.

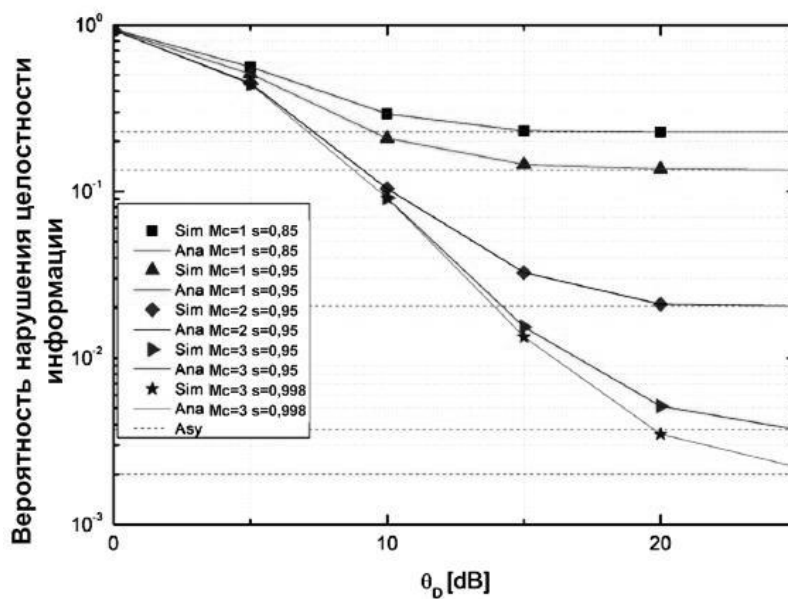


Рисунок 4.4 – Вероятность нарушения целостности информации для различных  $M_c, s$  в зависимости от целевого уровня секретности

Для таких параметров, как количество малых сот, количество прослушивающих устройств и соответствующих оценок параметров постоянное для эксперимента с параметрами  $c=2$ ,  $n=1$ ,  $\{m_R, m_E, m_J, m_D\} = \{2, 2, 3, 2\}$  и  $\{\theta_R, \theta_E, \theta_J\} = \{10, 10, 10\}$  дБ (рисунок 4.4).

На рисунке представлена зависимость вероятности нарушения целостности информации для различного количества малых сот ( $Mc$ ) и уровней получаемого сигнала ( $s$ ). Видно, что, при  $Mc=1$ , вероятность нарушения целостности информации уменьшается, в случае увеличения целевого уровня секретности транспортной сети. Следовательно, если целевой уровень секретности увеличивается, то повышается уровень надежности транспортной сети, и система работает эффективнее.

Кроме того, при  $s=0,95$  и увеличении количества малых сот с  $Mc=1$  до  $Mc=3$ , вероятность нарушения целостности информации уменьшается, из-за увеличения мощности принимаемого сигнала в устройстве-получателе услуг.

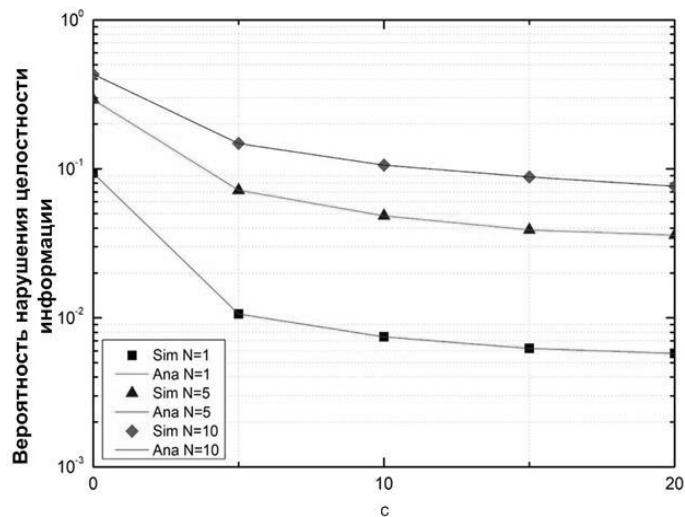


Рисунок 4.5 – Зависимость влияния плотности сетей на вероятность нарушения целостности информации

На рисунке 4.5 представлена зависимость влияния плотности сетей на вероятность нарушения целостности информации от количества

промежуточных соединителей  $s$  для следующих параметров  $M_s = 10$ ,  $s = 0,998$   $\{m_R, m_E, m_J, m_D\} = \{2, 2, 2, 3\}$  и  $\{\theta_R, \theta_E, \theta_J, \theta_D\} = \{10, 10, 10, 10\}$  дБ.

Для всех  $N = \{1, 5, 10\}$ , вероятность нарушения целостности информации уменьшается, если есть большее количество промежуточных соединителей за счет кооперативной коммуникации.

Однако, если промежуточных соединительных нет или мало, то при увеличении количества прослушивающих устройств вероятность нарушения целостности информации увеличивается.

Это связано с тем, что достижимая пропускная способность каналов от прослушивающих устройств становится выше.

#### 4.2.3 Экспериментальное оценивание точности разработанного комплексного показателя оценок качества работы транспортной сети МОС

Методы прогнозирования используются для минимизации количества обновлений данных зависимости величины комплексного показателя оценок качества работы транспортной сети МОС от скорости подключения. Оценка эффективности предложенных методов путем исследования следующих имитационных моделей: оценки объема выделяемой пропускной способности; оценки задержек, вносимых планировщиком контроллера базовой станции; оценки качества работы сети на основе многокритериальной теории полезности.

Рассмотрим экспериментальную оценку для следующих исходных данных. Пусть каждый из подключаемых абонентов генерирует следующий поток трафика, изменения которого представлены на рисунке 4.6. Данные трафика собраны с помощью программного обеспечения Wire Shark [102]. Следующим шагом является прогнозирование ресурсов, необходимых для качественного обслуживания поступающего трафика. Согласно (3.49)

необходимо оценить компоненты комплексного показателя: композитной функции полезности и функции производительности.

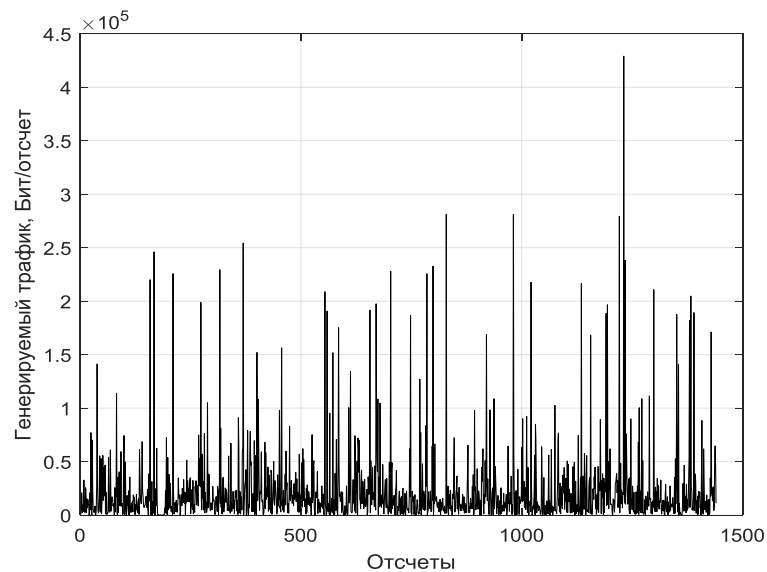


Рисунок 4.6 – Трафик, генерируемый пользователем в течение исследуемого периода

В «Метод 1» получены значения оценок качества работы сети с использованием известных методов прогнозирования. «Метод 2» – значения оценок качества работы сети с использованием обоснованного в работе метода прогнозирования.

На рисунках 4.7 - 4.10 представлены полученные функциональные зависимости характеризующие эффективность использования ресурсов, выделяемых для пользователей одной базовой станции в транспортной сети МОС. Методы различаются типами получаемых оценок: «Исходное значение» – практически измеренные значения [101]; «Метод 1» – значения полученные на основе известных методов прогнозирования; «Метод 2» – значения полученные на основе обоснованного в работе метода прогнозирования.

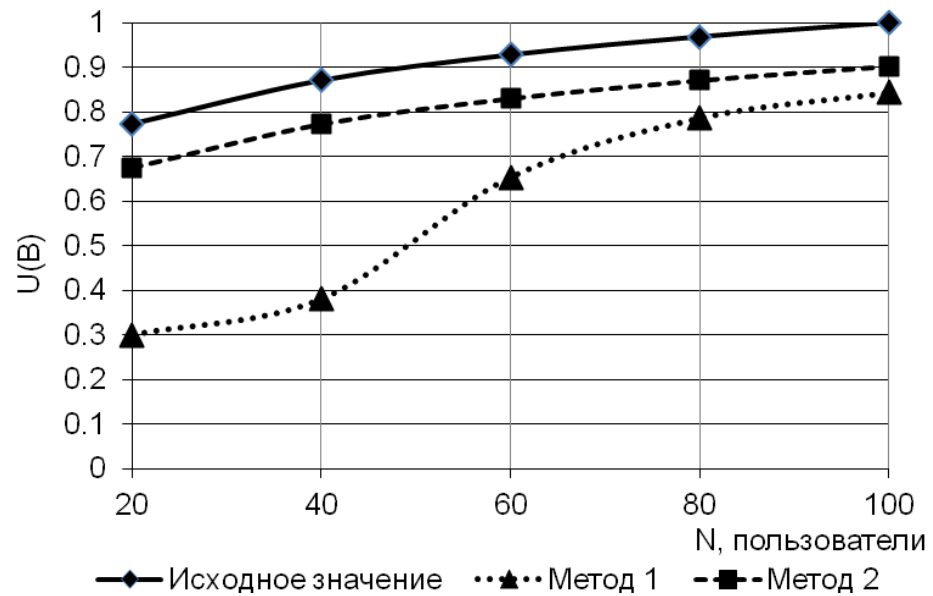


Рисунок 4.7 – Зависимость оценок функции «полезности» пропускной способности от количества пользователей

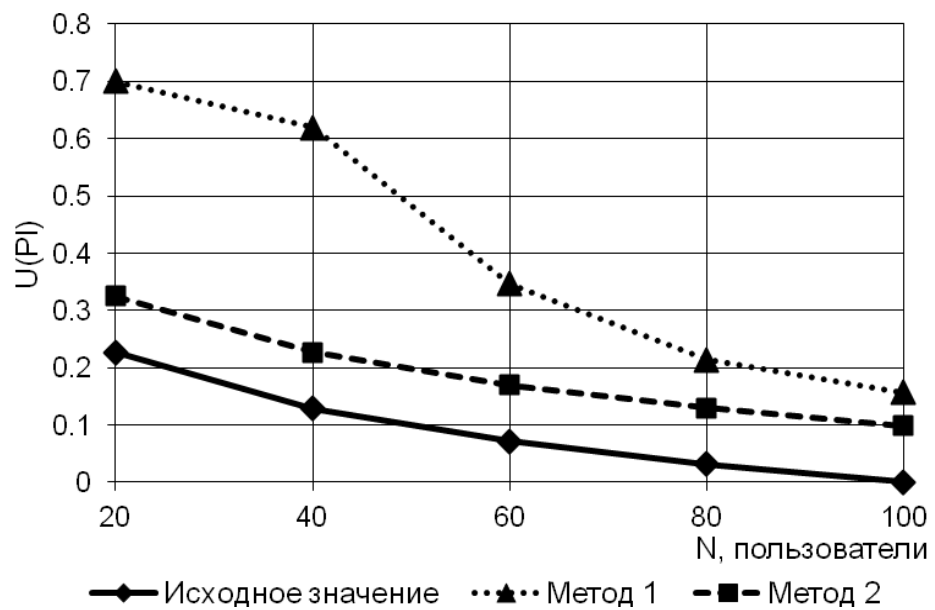


Рисунок 4.8 – Зависимость оценок функции «полезности» вероятности потерь от количества пользователей

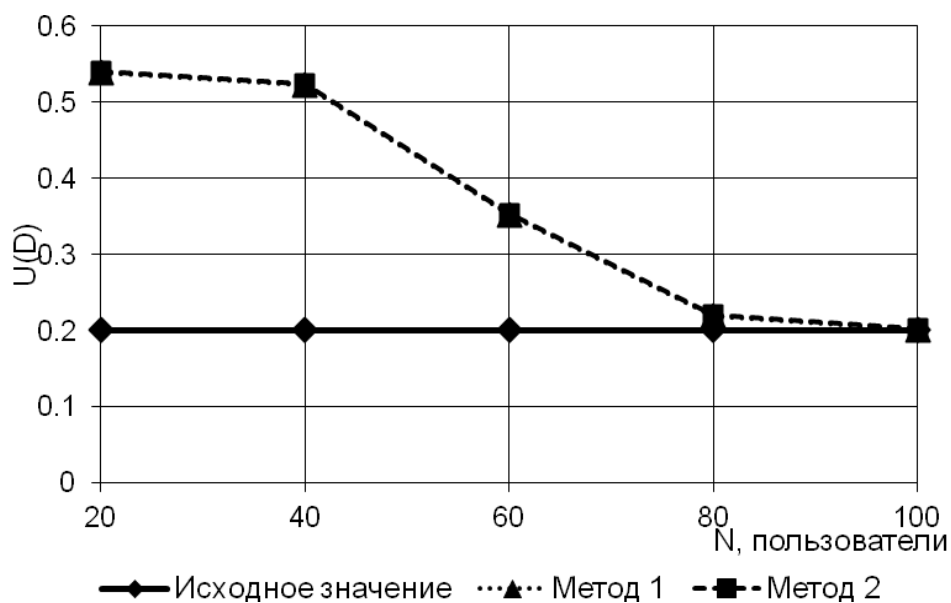


Рисунок 4.9 – Зависимость оценок функции «полезности» задержки от количества пользователей

Значение функциональных зависимостей функции «полезности» утилизации каналов от количества пользователей представлено на рисунке 4.10.

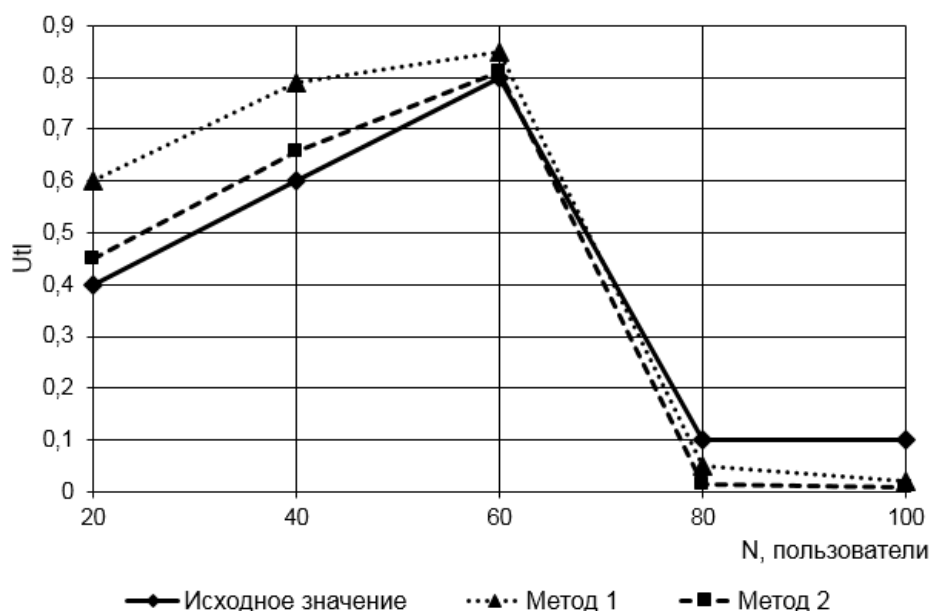


Рисунок 4.10 – Зависимость оценки эффективности использования ресурсов сети от количества подключаемых пользователей



Общее значение полученного критерия качества работы транспортной сети МОС представлено на рисунке 4.11.

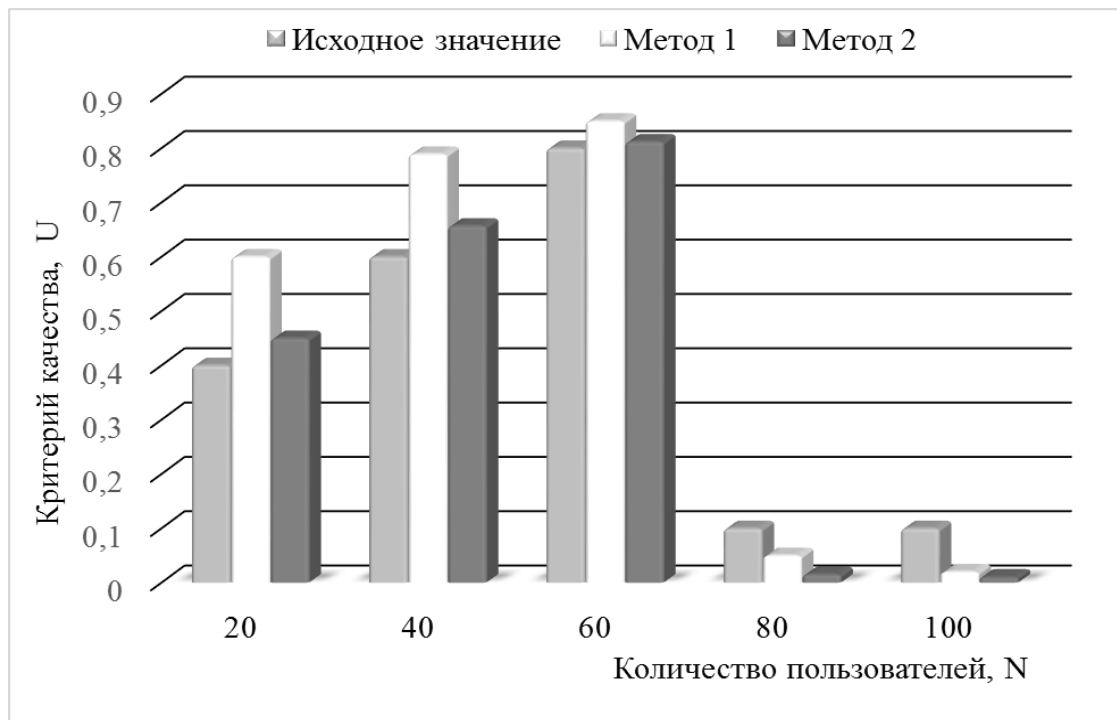


Рисунок 4.11 – Зависимость критерия качества работы транспортной сети МОС от количества подключаемых пользователей

Для «Метод 1» средняя абсолютная процентная ошибка составляет 36,3%, а для разработанного метода прогнозирования, «Метод 2», – 15%. Следовательно, разработанный метод позволяет повысить точность прогнозирования оценок качества работы транспортной сети мобильного оператора связи на 15%, по сравнению с существующими, при допустимых параметрах качества обслуживания (QoS).

#### 4.3 Практическое значение полученных результатов

Особенность оценки необходимой пропускной способности заключается в сложности описания динамики поступающего трафика, а также необходимости нахождения решения задач, относящихся к различным

уровням модели взаимодействия открытых систем. Экспериментальные исследования и анализ многочисленных измерений информационных потоков в современных телекоммуникационных сетях указывают на их специфическую природу.

Последние зависят от множества факторов: от выполнения требований по обеспечению параметров качества обслуживания для абонента до изменения оценки утилизации каналов. Использование одной модели прогнозирования для всех оценок одновременно приводит к ухудшению их точности. Относительность значений функции «полезности», позволяет переходить к безразмерным оценкам параметров качества обслуживания, что, в свою очередь, позволит сформировать комплексный критерий для оценки качества работы транспортной сети. Последний используется для повышения эффективности использования канального ресурса.

Применение предложенных в диссертационной работе методов для прогнозирования оценок качества работы транспортной сети мобильного оператора связи, позволяет увеличить эффективность использования ресурсов этой сети. Решение задачи направлено на уменьшение числа перегрузок транспортной сети, за счет оптимального перераспределения имеющихся сетевых ресурсов. Кроме того показано, что реализация результатов работы позволяет повысить точность прогнозирования оценок качества работы транспортной сети мобильного оператора связи на 15% , по сравнению с существующими, при обеспечении заданных параметров качества обслуживания.

Использование представленного гибридного метода прогнозирования возможно в контроллерах базовых станций с последующей передачей в ядро мобильной сети. Суть применения состоит в построении зависимости оценки качества работы транспортной сети от количества подключаемых пользователей для каждого контрольного периода времени. Контрольный период времени зависит от условий использования базовой станции: сельская местность, городская и плотная городская застройка.

#### 4.4 Рекомендации по использованию результатов работы

Предложенные математические модели и алгоритмы, которые их используют, а также результаты моделирования могут использоваться в качестве методического материала для изучения процессов, имеющих место в транспортных сетях мобильных операторов связи. Материал, собранный в ходе работы над исследованиями, а также синтезированные прогностические модели могут использоваться в качестве методических рекомендаций в рамках курсов, направленных на изучения моделей, методов прогнозирования инфокоммуникационных систем, сетей и их компонент [103]. Так, самоподобный характер трафика абонентов и его высокая пачечность требуют от прогностических алгоритмов жесткой зависимости от ее параметров. К таким параметрам можно отнести интервал корреляции. В общем случае размер интервала корреляции используется как размер окна прогноза.

Классический подход основан на использовании положений теории телетрафика, в частности формулы Норроса, для определения основных показателей качества обслуживания (задержка, вероятность потерь пакетов), а также эмпирические формулы. К достоинствам метода можно отнести его универсальность. Независимо от вида поступающего трафика имеются возможности его оценки. Основным недостатком классического подхода остается его статистический характер, что для современных реалий недопустимо.

В качестве базовой, исследовалась аналитическая модель прогнозирования оценок объема выделяемой пропускной способности. Получены зависимости качества ее работы от величины исходных параметров. Так, к основным параметрам исходной модели относятся интервал статистики и интервал регулирования. Рекомендованные значения и одного и второго интервалов, в отсчетах, зависят от типа используемого трафика. Так, для трафика, с показателем Херста не менее 0,78

рекомендуемое значение интервала статистики 1 или 2 отсчета, для интервала регулирования в 8 или 10 отсчетов. Разброс отсчетов связан с размерностью исследуемой последовательности. Оценка работы исследуемого алгоритма показала, что он обладает таким недостатком как высокая ошибка прогнозирования величины пропускной способности. В результате, было предложено несколько его модификаций, которые устраняют вышеназванные недостатки. Для повышения точности прогнозирования рекомендовано использование математического прогнозирования на основе ARFIMA-модели. Здесь, в качестве горизонта прогноза рекомендуется использовать интервал корреляции. Для улучшения характеристик работы базовой модели предложена прогностическая модель на основе комбинированного подхода. Так, модель интегральных оценок и модель адаптивного регулирования состоит из прогностической ARFIMA-модели и модели оценок необходимой пропускной способности на основе суммарной работы исходной последовательности трафика за интервал регулирования. Интегральная модель рекомендуется к применению в сетях с малой степенью фрактальности или к монотонно изменяющимся трафикам. Модель с алгоритмом адаптивного регулирования использует интервал регулирования разной длины, что позволяет «отследить» выброс и зарезервировать под него, только на период действия, необходимую величину пропускной способности. А, в течение остального времени, на основе интегральных оценок резервируется необходимая пропускная способность. Наравне с методами прогнозирования резервируемой пропускной способности рассматривался такой способ управления трафиком, как его кондиционирование. Все упомянутые ранее алгоритмы использовали статистические приемы для сбора, обработки и расчета требуемых характеристик. Повышение точности прогнозирования можно достичь путем уменьшения пачечности трафика: путем кондиционирования. Для получения динамических характеристик было предложено использовать аппарат дискретно-событийных систем и аппарат идемпотентных алгебр.

Аппарат дискретно-событийных систем позволяет достаточно точно описать динамику системы, например, в терминах сетей Петри, а аппарат идемпотентных алгебр позволяет, на основе синтезированных временно-событийных графов, получить систему динамических уравнений. Использование данных аппаратов рекомендуется для отображения и синхронизации систем любой сложности. Это обусловлено: простотой представления сложного объекта и понимания всех взаимосвязей внутри него, возможностью перехода от нелинейных динамических уравнений к уравнениям линейного вида, построению универсальной модели и возможности использования иерархических моделей. Последнее осуществимо благодаря достаточно простым переходам от одной части модели к модели в целом. На основе вышесказанного в исследовательской работе представлена динамическая модель управления допуском в буфер ограниченной длины и динамическая модель управления работой планировщика. Решая обратную задачу модели управления работой планировщика, оцениваем максимально-допустимую величину задержек, вносимых процессом обслуживания. Следовательно, формализован метод определения необходимого буферного пространства для каждой из очередей.

Разработаны требования к оценкам критериев качества работы транспортной сети. Так, обоснован переход к относительным значениям. Это осуществимо следующим образом: определение весов, составляющих в общем критерии, разработка функций полезности для оператора связи и нахождение оптимальных решений. Для этого впервые было предложено использование функций «полезности» для решения задач прогнозирования. Описаны функции «полезности» основных видов трафика для основных параметров качества обслуживания. Так, относительность значений, функций «полезности» позволяет переходить к безразмерным оценкам параметров качества обслуживания, что позволяет учесть разнотипные показатели в рамках единого критерия. Для любого типа трафика можно сформировать составной показатель качества обслуживания либо составную функцию

полезности для определенного типа трафика. Как итог сформирован комплексный показатель эффективности работы транспортной сети МОС, состоящий из композитной функции полезности и функции производительности. К ним выдвинуты соответствующие ограничения, которые зависят от используемой в МОС технологии.

Для исследования эффективности разработанных алгоритмов и моделей синтезирована имитационная модель, позволяющая экспериментально доказать работоспособность представленного метода. В качестве оценки точности представленного метода, также, как и в пп.2, использовалось значение средней абсолютной процентной ошибки. Показано, что ее значение улучшилось с 36% до 21%.

Полученные результаты могут быть использованы научно-исследовательскими, проектными организациями, телекоммуникационными компаниями при оптимизации и проектировании сетей стандарта от 4G и выше.

Рекомендации производству.

Универсальность программной реализации предложенного метода позволяет внедрить её на любом типе оборудования, формирующего транспортные сети МОС.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в следующем.

1. Проведение исследований для дополнения комплексного показателя качества работы транспортной сети МОС критерием, описывающим перегрузки (сбои).

2. Проведение исследований для получения зависимостей комплексного показателя оценок качества работы транспортной сети МОС от энергопотребления базовых станций и терминального оборудования.

#### 4.5 Выводы по разделу 4

В разделе представлено описание логики работы метода гибридного прогнозирования, имитационной модели предложенного гибридного метода прогнозирования, а также экспериментальные данные, на основе которых сделаны основные выводы.

Для проверки работоспособности и адекватности предложенных моделей синтезирована имитационная модель, которая реализована в программном коде. В качестве исходных данных вводятся реализации трафика, отслеженные контроллером базовой станции за исследуемый период времени. В разделе дано подробное описание логики работы программной реализации.

Для экспериментальной оценки предложенного гибридного метода прогнозирования получены функциональные зависимости оцениваемых параметров от изменения величин интервалов статистики и регулирования. Согласно полученным зависимостям, величина интервала статистики, удовлетворяющая необходимым значениям вероятности потерь и утилизации канала составляет не менее 6 отсчетов, при фиксированной величине интервала регулирования (не менее 20 отсчетов). А величина интервала перераспределения – 10, при фиксированном размере интервала статистики в 2 отсчета. Затем получены функциональные зависимости вероятности нарушения целостности информации. Показано, что если промежуточных соединительных нет или мало, то при увеличении количества прослушивающих устройств вероятность нарушения целостности информации увеличивается. Заключительным этапом явилось экспериментальное оценивание точности разработанного комплексного показателя оценок качества работы транспортной сети МОС. В результате получены оценки средней абсолютной процентной ошибки. Они составляют: для «Метод 1» – 36,3%, а для разработанного метода прогнозирования, «Метод 2», – 21%. Следовательно, разработанный метод позволяет повысить

точность прогнозирования оценок качества работы транспортной сети мобильного оператора связи на 15% , по сравнению с существующими, при допустимых параметрах качества обслуживания (QoS).

Использование представленного гибридного метода прогнозирования возможно в контроллерах базовых станций с последующей передачей в ядро мобильной сети. Суть применения состоит в построении зависимости оценки качества работы транспортной сети от количества подключаемых пользователей для каждого контрольного периода времени. Контрольный период времени зависит от условий использования базовой станции: сельская местность, городская и плотная городская застройка.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научно-практическая задача повышения эффективности функционирования транспортной сети мобильного оператора связи, за счет научного обоснования и практического применения гибридного метода прогнозирования оценок качества ее работы, формирующих комплексный показатель.

По результатам работы сформулированы следующие выводы.

1. Из-за высокой концентрации высокоскоростного трафика и ограниченности имеющихся сетевых ресурсов, транспортная сеть мобильного оператора связи является «местом» принятия решений. Прогнозирование оценок качества работы транспортной сети МОС, в зависимости от количества подключаемых пользователей и типа формируемого ими трафика, позволит повысить эффективность ее работы. Существующие модели прогнозирования из-за разнородной природы оценок качества обладают ограниченностью и низкой точностью. Следовательно, повышение качества работы транспортной сети, вследствие использования комплексного критерия и обоснования метода прогнозирования, является актуальной задачей, имеющей большое значение для операторов мобильной связи.

2. В фундаментальных работах по теме исследования имело место решение частных задач, в то время как развитие технической базы транспортной сети МОС обуславливает актуальность системного подхода к разработке обобщающих методов управления, прогнозирования, оценки качества, эффективности и надежности функционирования, отличающихся универсальностью и предполагающих комплексное применение математических аппаратов прогнозирования.

3. Осуществлена модификация прогностической модели оценки величины выделяемой пропускной способности путем использования ARFIMA-модели для прогнозирования поступающего трафика и адаптивного интервала перераспределения, что повышает адекватность модели и обеспечивает повышение эффективности использования канальных ресурсов до 12% при заданных значениях параметров качества обслуживания.

4. Разработан метод оценки размера буфера очередей контроллера базовой станции, основанный на применении дискретно-событийной модели работы планировщика в базисе Max-Plus алгебры, учитывающей задержки на обработку запросов. Это позволяет формализовать процесс управления очередями в пространстве состояний для повышения точности прогнозирования до 10,8%.

5. Обоснован гибридный метод прогнозирования оценок качества работы транспортной сети МОС, учитывающий комплексный критерий, который состоит из композитной функции полезности и функции производительности. Метод позволяет повысить точность прогнозирования оценок качества работы транспортной сети мобильного оператора связи на 15%, по сравнению с существующими, при допустимых параметрах качества обслуживания (QoS).

6. Результаты диссертационной работы внедрены в производственный процесс ГУП ДНР «УГЛЕТЕЛЕКОМ», а материалы исследования включены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Development of the model for a backhaul network based on the long term evolution technology / L. Tokar [et al.]. – Текст : непосредственный // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2017. – № 2(9). – С. 38–44.
2. Климов, В. В. Исследование трафика backhaul сети мобильного оператора связи / В. В. Климов. – Текст : непосредственный // Информационное пространство Донбасса : проблемы и перспективы материалы III Республиканской с международным участием научно-практической конференции. – Донецк : ДонНУЭТ, 2020. – С. 42–46.
3. Venkatesan, G. K. Wireless backhaul for LTE – requirements, challenges and options / G. K. Venkatesan, K. Kulkarni. – Текст : непосредственный // 2nd International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems. – 2008. – P. 1–3.
4. Кучерявый, Е. А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет / Е. А. Кучерявый. – Санкт-Петербург : Наука и Техника, 2004. – 336 с. – Текст : непосредственный.
5. Листопад, Н. И. Обеспечение качества обслуживания в сетях с коммутацией пакетов / Н. И. Листопад, И. О. Величкевич. – Текст : электронный // Веснік сувязі. – Минск, 2009. – № 2. – С. 17–23. – URL: [http://www.vsel.by/File/2009\\_02/Listopad.pdf](http://www.vsel.by/File/2009_02/Listopad.pdf) (дата обращения: 22.12.2021).
6. Chao, J. H. Quality of Service Control in High-Speed Networks / H. J. Chao, Xiaolei Guo. – Текст : непосредственный // John Wiley & Sons, Inc. – 2002. – P. 441.
7. Huston, G. Best Effort Networking / G. Huston. – Текст : электронный // Personal site of Geoff Huston [сайт]. – 2001. – URL: <https://www.potaroo.net/ispcolumn/2001-09-best.pdf> (дата обращения: 22.12.2021).

8. Clark, D. Explicit Allocation of Best Efforts Packet Delivery Service / D. Clark, W. Fang. – Текст : непосредственный // IEEE. ACM Transactions on Networking. – 1998. – Vol. 6, no. 4. – P. 362–363.
9. Braden, R. RFC1633 – Integrated Services in the Internet Architecture : an Overview / R. Braden. – Текст : электронный // Internet FAQ Archives. – 1994. – URL: <http://www.faqs.org/rfcs/rfc1633.html> (дата обращения: 02.02.2022).
10. Harju, J. Cooperation and comparison of DiffServ and IntServ performance Measurements / J. Harju, P. Kivimaki. – Текст : электронный // 25th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks : LCN 2000. – P. 177– URL: <https://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/LCN.2000.891025> (дата обращения: 02.03.2022).
11. An Architecture for Differentiated Services / S. Blake [et al.]. – Текст : электронный // Concord, 1998. – URL: <https://archive.org/details/rfc2475/mode/2up?view=theater> (дата обращения: 05.03.2022)
12. RFC 3290 An Informal Management Model for Diffserv Routers / Y. Bernet [et al.]. – Текст : электронный // Internet FAQ Archives. – 1994. – URL: <ftp://ftp.rfc-editor.org/in-notes/rfc3290.txt> (дата обращения: 05.03.2022).
13. Cisco Systems. DiffServ – The Scalable End-to-End QoS Model. – Текст : электронный // Cisco : Software, Network, and Cybersecurity Solutions – Cisco : официальный сайт. – 2005. – URL: [https://www.cisco.com/en/US/technologies/tk543/tk766/technologies\\_white\\_paper09186a00800a3e2f.html](https://www.cisco.com/en/US/technologies/tk543/tk766/technologies_white_paper09186a00800a3e2f.html) (дата обращения: 20.03.2022).
14. Nivetha, S. K. A swarm-based hybrid routing protocol to support multiple Quality of Service (QoS) metrics in mobile ad hoc networks / S. K. Nivetha, R. Asokan, N. Senthilkumaran. – Текст : электронный // Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT). – 2013. – P. 1–8. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/271463682\\_A\\_swarm-](https://www.researchgate.net/publication/271463682_A_swarm-)

[based hybrid routing protocol to support multiple Quality of Service QoS metrics in mobile ad hoc networks](#) (дата обращения: 20.03.2022).

15. Szigeti, T. End-to-end QoS network design / T. Szigeti, C. Hattingh // Cisco Press, 2004. – 768 p. – Текст : непосредственный.
16. Secrecy performance of finite-sized cooperative full-duplex relay systems with unreliable backhauls / H. Liu [et al.]. – Текст : непосредственный // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2017. – Vol. 65, № 23. – P. 6185–6200.
17. Cognitive Heterogeneous Networks with Best Relay Selection over Unreliable Backhaul Connections / H. T. Nguyen [et al.]. – Текст : непосредственный // IEEE 86-th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). – Toronto, 2017. – P. 1–5.
18. Wireless backhauling of 5G small cells : challenges and solution approaches / U. Siddique [at al.]. – Текст : непосредственный // IEEE Wirel Commun, 2015. – Vol. 22(5). – P. 22–31.
19. Ali, M. S. Performance analysis of JT-CoMP transmission In Heterogeneous Network over unreliable backhaul / M. S. Ali, M. Synthia. – Текст : непосредственный // ICEEICT. – Savar, 2015. – P. 1–5.
20. Secure Energy Harvesting Relay Networks With Unreliable Backhaul Connections / C. Yin [at al.]. – Текст : непосредственный // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 12074–12084.
21. Liu, H. Outage probability of finite-sized selective relaying systems with unreliable backhauls / H. Liu, K. S. Kwak. – Текст : непосредственный // ICTC, 2017. – P. 1232–1237.
22. Cognitive Heterogeneous Networks With Multiple Primary Users and Unreliable Backhaul Connections / C. Yin [et al.]. – Текст : непосредственный // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 3644–3655.
23. Климов, В. В. Анализ оценок эффективности работы транспортной сети мобильного оператора связи / В. В. Климов,

М. Н. Чепцов. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов ДОНИЖТ. – Донецк, 2020. – № 56. – С. 43–48.

24. Афанасьев, В. Н. Анализ временных рядов и прогнозирование : учебник / В. Н. Афанасьев. – Саратов : Ай Пи Ар Медиа, 2020. – 310 с. – Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/90196.html/> (дата обращения: 01.04.2022).

25. Вакуленко, С. А. Практический курс по нейронным сетям : учебное пособие / С. А. Вакуленко, А. А Жихарева. – Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2018. – 71 с. – Текст : непосредственный.

26. Cybenko, G. V. Approximation by Superpositions of a Sigmoidal function / G. V. Cybenko. – Текст : непосредственный // Mathematics of Control, Signals and Systems. – 1989. – Т. 2, № 4. – С. 303–314.

27. Kreinovich, V. Y. Arbitrary nonlinearity is sufficient to represent all functions by neural networks : A theorem / V. Y. Kreinovich. – Текст : электронный // Neural Networks, 1990. – Vol. 4, № 3. – P. 381–383. – URL: <http://dblp.uni-trier.de/db/journals/nn/nn4.html#Kreinovich91> (дата обращения: 01.04.2022). – Режим доступа: для авторизир. пользователей.

28. Горожанина, Е. И. Нейронные сети : учебное пособие / Е. И. Горожанина. – Самара : Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2017. – 84 с. – Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/75391.html> (дата обращения: 01.04.2022). – Режим доступа: для авторизир. пользователей.

29. Andrew Ng. Regularization – Cost Function. – Текст : электронный // Learn Programming [сайт]. – 2023. – URL: <https://learnprogrammingwitheasy.netlify.app/andrew-ng-machine-learning-linear-regression> (дата обращения: 01.02.2023).

30. Горожанина, Е. И. Нейронные сети : учебное пособие / Е. И. Горожанина. – Самара : Поволжский государственный университет

телекоммуникаций и информатики, 2017. – 84 с. – Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/75391.html> (дата обращения: 01.04.2022). – Режим доступа: для авторизир. пользователей.

31. Смоленцев, Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Н. К. Смоленцев. – Саратов : Профобразование, 2017. – 628 с. – Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/63941.html/> (дата обращения: 01.04.2022). – Режим доступа: для авторизир. пользователей.

32. Шелухин, О. И. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения / О. И. Шелухин, А. В. Осин, С. М. Смольский ; под ред. О. И. Шелухина. – Москва : Физматлит, 2008. – 368 с. : ил. – Текст : непосредственный.

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

34. Костромицкий, А. И. Подходы к моделированию самоподобного трафика / А. И. Костромицкий, В. С. Волотка. – Текст : непосредственный // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 46. – С. 46–49.

35. Rose, O. Estimation of the Hurst Parameter of Long Range Dependent Time Series / O. Rose. – Текст : электронный // Institute of Computer Science. – 1996. – 137p. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/2674323\\_Estimation\\_of\\_the\\_Hurst\\_Parameter\\_of\\_Long-Range\\_Dependent\\_Time\\_Series](https://www.researchgate.net/publication/2674323_Estimation_of_the_Hurst_Parameter_of_Long-Range_Dependent_Time_Series) (дата обращения: 01.04.2022).

36. Ложковский, А. Г. Модель мультисервисного трафика и метод расчёта параметров QoS при его обслуживании / А. Г. Ложковский. – Текст : непосредственный // Радиотехника. – 2009. – Вып. 157. – С. 48–52.

37. Kee-Yin Ng, J. Some New Findings on the Self-Similarity Property in Communications Networks and on Statistical End-to-End Delay Guarantee :

Technical Report [JNG05-01] / J. Kee-Yin Ng, Shibin Song, Bi Hai Tang // Department of Computer Science. – Hong Kong, 2001. – 14 p. – Текст : непосредственный.

38. Кричевский, А. М. Прогнозирование временных рядов с долговременной корреляционной зависимостью : специальность 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Андрей Михайлович Кричевский ; Санкт-Петербургский государственный университет. – Текст : непосредственный.

39. Szcześniak, I. Approximate analytical performance evaluation of synchronous bufferless optical packet-switched networks. – Текст : непосредственный / I. Szcześniak, B. Mukherjee, T. Czachórski // Journal of Optical Communications and Networking. – 2011. – №. 3(10). – P. 806–815.

40. Czachórski, T. Diffusion Approximation as a Modelling Tool / T. Czachórski, F. Pekergin. – Текст : непосредственный // A Handbook on Convergent Multi-Service Networks and Next Generation Internet. – 2011. – P. 447–476.

41. A model of boot-up storm dynamics / T. Atmaca [et al.]. – Текст : непосредственный // Proceeding of 27th International Symposium of Computer and Information Sciences. – 2013. – P. 371–379.

42. Czachorski, T. Transient states analysis - diffusion approximation as an alternative to Markov models, fluid-flow approximation and simulation / T. Czachorski, T. Nycz, F. Pekergin. – Текст : непосредственный // Proceedings of the 14th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2009). – 2009. – P. 13–18.

43. Performance Evaluation of a Multiuser Interactive Networking System : A Comparison of Modelling Methods / T. Czachórski [et al.]. – Текст : непосредственный // Proceeding of 26th International Symposium on Computer and Information Sciences (ISCIS 2011). – 2011. – P. 215–221.



44. Domańska, J. Internet Traffic Source Based on Hidden Markov Model / J. Domańska, A. Domański, T. Czachórski. – Текст : непосредственный // NEW2AN, volume 6869 of Lecture Notes in Computer Science. – 2011. – P. 395–404.
45. Czachórski, T. Queue with limited volume, a diffusion approximation approach / T. Czachórski, T. Nycz, F. Pekergin. – Текст : непосредственный // Proceedings of the 25th International Symposium on Computer and Information Sciences. – 2010. – P. 71–74.
46. Czachórski, T. Transient states of priority queues – a diffusion approximation study / T. Czachórski, T. Nycz, F. Pekergin. – Текст : непосредственный // International Journal On Advances in Networks and Services. – 2009. – Vol. 2, № 2 and 3. – P. 205–217.
47. Dohler, M. Internet of skills, where robotics meets AI, 5G, and the Tactile Internet / M. Dohler [et al.]. – Текст : электронный // European Conference on Networks and Communications (EuCNC). – 2017. – P. 1–5. – URL:  
[https://www.researchgate.net/publication/318477305\\_Internet\\_of\\_skills\\_where\\_robotics\\_meets\\_AI\\_5G\\_and\\_the\\_Tactile\\_Internet](https://www.researchgate.net/publication/318477305_Internet_of_skills_where_robotics_meets_AI_5G_and_the_Tactile_Internet) (режим доступа: 01.04.2022).
48. Abdellah, Ali R. Delay prediction in IoT using Machine Learning Approach / Ali R. Abdellah, O. A. Mahmood, A. Koucheryavy. – Текст : электронный // 12-th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – 2020. – P. 275–279. – URL:  
[https://www.researchgate.net/publication/346222071\\_Delay\\_prediction\\_in\\_IoT\\_using\\_Machine\\_Learning\\_Approach](https://www.researchgate.net/publication/346222071_Delay_prediction_in_IoT_using_Machine_Learning_Approach) (дата обращения: 01.04.2022).
49. Czachórski, T. Diffusion approximation model for the distribution of packet travel time at sensor networks / T. Czachórski, K. Grochla, F. Pekergin. – Текст : непосредственный // Wireless Systems and Mobility in Next Generation Internet : 4th International Workshop of the EuroNGI/EuroFGI Network of Excellence. – 2008. – P. 10–25.

50. Czachórski, T. A tool to model network transient states with the use of diffusion approximation / T. Czachórski, M. Pastuszka, F. Pekergin. – Текст : непосредственный // Proceeding of Computer Performance Evaluation : Modelling Techniques and Tools : 10-th International Conference. – 1998. – P. 344– 347.

51. Гребенников, А. В. Моделирование сетевого трафика и прогнозирование с помощью модели ARIMA / А. В. Гребенников, Ю. А. Крюков, Д. В. Чернягин. – Текст : электронный // Системный анализ в науке и образовании : электронный журнал. – 2011. – Вып. 1. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_21249790\\_96107766.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_21249790_96107766.pdf) (дата обращения : 05.05.2022).

52. Данилов, Н. Н. Курс математической экономики : учебное пособие / Н. Н. Данилов ; [рецензенты : Н. В. Осокина, В. А. Павский]. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2002. – 435 с – Текст : непосредственный.

53. Shenker, S. Fundamental Design Issues for the Future Internet / S. Shenker. – Текст : непосредственный // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 1995. – Vol. 13, № 7. – P. 1176–1188.

54. Liu, C. Utility-based Bandwidth Allocation for Triple Play Services / C. Liu, Lei Shi, Bin Liu. – Текст : электронный // Fourth European Conference on Universal Multiservice Networks (ECUMN'07). – 2007. – P. 327–336. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/224060249\\_Utility-Based\\_Bandwidth\\_Allocation\\_for\\_Triple-Play\\_Services](https://www.researchgate.net/publication/224060249_Utility-Based_Bandwidth_Allocation_for_Triple-Play_Services) (дата обращения: 05.05.2022).

55. Abdelrazig, Y. Utility Assessment Model for Wireless Technology in Construction / Y. Abdelrazig, A. Ghanem. – Текст : непосредственный // International Scholarly and Scientific Research & Innovation. – 2015. – Vol. 9(5). – P. 1778–1781.

56. Гольдштейн, Б. С. Интеллектуальные сети / Б. С. Гольдштейн, И. М. Ехриель, Р. Д. Перле. – Москва : Радио и связь, 2003. – 500 с. : ил. – Текст : непосредственный.

57. Werner, A. K. Telecommunications in the year 2010 / A. K. Werner, A. D. Little. – Текст : непосредственный // Telcom report international. – 1995. – № 4. – Р. 10–13.
58. Petroff, V. Self-Similar Network Traffic : From chaos and Fractals to Forecasting and QoS / V. Petroff. – Текст : электронный // NEW2AN. – Sankt Petersburg, 2004. – Р. 110–118. – URL: [http://teletraffic.ru/public/pdf/Petroff\\_Forecasting%20and%20QoS\\_2003.pdf](http://teletraffic.ru/public/pdf/Petroff_Forecasting%20and%20QoS_2003.pdf) (дата обращения: 05.05.2022).
59. Фрактальный анализ и процессы в компьютерных сетях : учебное пособие / Ю. Ю. Громов [и др.]. – 2-е изд., стереотип. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 108 с. – Текст : непосредственный.
60. Вехбе, Ф. Влияние самоподобного трафика реального времени на показатели качества обслуживания / Ф. Вехбе, С. А. Заводов. – Текст : электронный // Радиотехника. – 2014. – Вып. 176. – С. 229–234. – URL: <https://masters.donntu.ru/2019/fkita/dubovaya/library/article8.pdf> (дата обращения: 05.05.2022).
61. Воронин, А. В. Моделирование технических систем : учебное пособие / А. В. Воронин ; Том. политехн. ун-т. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2013. – 130 с. – Текст : непосредственный.
62. Dronyuk, I. Synthesis of noise-like signals based on Ateb-functions / I. Dronyuk, M. Nazarkevych, O. Fedevych. – Текст : непосредственный // Communications in Computer and Information Science : Revised Selected Papers. – 2016. – Vol. 601. – Р. 132–140.
63. Боголюбов, Н. Н. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний / Н. Н. Боголюбов, Ю. А. Митропольский. – Москва : Наука, 1974. – 503 с. – Текст : непосредственный.
64. Назаркевич, М. А. Методы повышения эффективности полиграфической защиты на основе Ateb-функций : монография / М. А. Назаркевич. – Львов : Изд-во Львов. политехники, 2011. – 188 с. – Текст : непосредственный.

65. Droniuk, I. Construction of Noise-like signals Based on Ateb – Functions / I. Droniuk, O. Fedevych. – Текст : непосредственный // Опыт разработки и использования САПР в микроэлектронике (CADSM 2015) : материалы XIII Международной научно-технической конференции. – Львов : Поляна, 2015. – С. 42–44.

66. Дронюк, И. М. Исследование периодических колебательных процессом путем разложения Ateb-функций в числовые ряды Тейлора и Фурье / И. Дронюк, М. Назаркевич, М. Дронюк. – Текст : непосредственный // Компьютерные науки та информационные технологии : [сб. науч. тр.] / отв. ред. Ю. Н. Рашкевич. – Львов : Изд-во Львов. политехники, 2010. – С. 198–203.

67. Дронюк, И. М. Идентификация защищенных электронных и полиграфических документов на основе теории Ateb-функций / И. М. Дронюк, М. А. Назаркевич. – Текст : непосредственный // Компьютерные науки и информационные технологии : CSIT 2009. – Львов, 2009. – С. 63–66.

68. Кривулин, Н. К. Методы идемпотентной алгебры в задачах моделирования и анализа сложных систем / Н. К. Кривулин. – Санкт-Петербург : Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2009. – 256 с. – Текст : непосредственный.

69. Расина, И. В. Дискретно-непрерывные модели и оптимизация управляемых процессов / И. В. Расина. – Текст : электронный // Программные системы : теория и приложения. – 2011. – С. 49–72. – URL: <http://www.mathnet.ru/links/48b40ef2bd8f963f1acc97d7a85c9d31/ps60.pdf> (дата обращения: 01.09.2022).

70. Милов, Д. С. Методы идемпотентной алгебры и анализа при исследовании сетей с очередями : специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Денис

Сергеевич Милов ; Санкт-Петербургский государственный университет. – Санкт-Петербург, 2000. – 99 с. – Текст : непосредственный.

71. Bouquard, J.-L. Application of an optimization problem in Max-Plus algebra to scheduling problems / J.-L. Bouquard, C. Lenté, J. Billaut. – Текст : электронный // Discret. Appl. Math. – 2006. – Vol. 154. – P. 2064–2079. – URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/81180594.pdf> (дата обращения: 01.09.2022).

72. Лемешко, А. В. Динамическая модель структурно-функционального синтеза транспортной ТКС / А. В. Лемешко, В. Л. Стерин. – Текст : электронный // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 3 (5). – С. 8 –17. – URL: [http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113\\_lemeshko\\_synthesis.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_lemeshko_synthesis.pdf) (режим доступа: 01.10.2022).

73. Алиев, Т. И. Основы моделирования дискретных систем : учебное пособие / Т. И. Алиев. – Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2009. – 363 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/43651> (дата обращения: 11.10.2022). – Режим доступа: для авторизир. пользователей.

74. Бессараб, В. И. Математические основы теории дискретно-непрерывных систем / В. И. Бессараб. – Донецк : ДонНТУ, 2011. – 175 с. – Текст : непосредственный.

75. Synchronization and Linearity An Algebra for Discrete Event Systems / F. Baccelli [et al.]. – Текст : электронный // Англия. – 1992. – URL: <https://www.rocq.inria.fr/metalau/cohen/SED/SED1-book.html> (дата обращения: 11.10.2022).

76. Лескин, А. А. Сети Петри в моделировании и управлении / А. А. Лескин, П. А. Мальцев, А. М. Спиридонов. – Ленинград : Наука, 1989. – 133 с. – Текст : непосредственный.

77. Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Дж. Питерсон ; пер. с англ. – Москва : Мир, 1984. – 264 с. : ил. – Текст : непосредственный.

78. Агеев, Д. В. Расчет параметров самоподобных информационных потоков, передающихся по каналам связи мультисервисной сети, при предоставлении услуг «Triple Play» / Д. В. Агеев, Д. В. Евлаш // Радиотехника : Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. – 2009. – Вып. 645. – С. 125–130. – Текст : непосредственный.

79. Research of the quality characteristics of self-similar traffic of a mobile communication network on the basis of software release / I. V. Strelkovskaya [et al.] // Information and Telecommunication Sciences. – Kyiv, 2020. – Vol. 11, 2. – P. 51–57. – Текст : непосредственный.

80. Чепцов, М. Н. Классический подход к прогнозированию оценок магистрального канала сети оператора мобильной связи / М. Н. Чепцов, В. В. Климов // Вестник ДонНУ. – 2021. – № 2. – С. 56–61 – (Серия Г : «Технические науки»). – Текст : непосредственный.

81. NASA-HTTP : The Internet Traffic Archive : [сайт]. – 2020. – URL: <http://ita.ee.lbl.gov/html/contrib/NASA-HTTP.html> (дата обращения: 22.05.2020). – Текст : электронный.

82. Syczewska, E. M. Empirical power of the Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin test / E. M. Syczewska. – Текст : электронный // New Economics Papers. – 2010 – 21 p. – URL: <http://www.sgh.waw.pl/instytut/zes/wp/aewp03-10.pdf> (дата обращения: 10.06.2021).

83. Testing the Null Hypothesis of Stationarity against the Alternative of a Unit Root / D. Kwiatkowski [et al.] // Journal of Econometrics. – 1992. – № 54. – С. 159–178. – Текст : непосредственный.

84. Мишулина, О. А. Лабораторный практикум по курсу «Введение в теорию нейронных сетей» : учебно-методическое пособие / О. А. Мишулина, А. Г. Трофимов, М. В. Щербинина. – Москва : МИФИ, 2007. – 112 с. – Текст : непосредственный.

85. Климов, В. В. Метод прогнозирования оценки пропускной способности / В. В. Климов. – Текст : непосредственный // Информатика и кибернетика. – Донецк, 2020. – № 4(22). – С. 54–61.

86. Zhigang, J. Analysis of the leaky bucket algorithm for priority services / J. Zhigang, Li Lemin // Springer : Journal of Electronics. – 1996. – Vol. 13, № 4. – P. 333–338. – Текст : непосредственный.

87. RFC 2309. Recommendations on queue management and congestion avoidance in the Internet / R. Braden [et al.]. – Текст : электронный // The Internet Society. – 1998. – URL: <http://tools.ietf.org/pdf/rfc2309.pdf> (дата обращения: 01.09.2020).

88. Dukkpati, N. Processor Sharing Flows in the Internet / N. Dukkpati, N. McKeown. – Текст : электронный // Stanford technical report. – 2005. – P. 267–281. – URL: <http://yuba.stanford.edu/~nanditad/RCP-IWQoS.pdf> (дата обращения: 01.09.2020).

89. Zhang, L. Virtual Clock : a new traffic control algorithm for packet switching networks. – Текст : электронный / L. Zhang // ACM Trans. Comput. Syst. – 1991. – Vol 9. – P. 101–124. – URL: <http://djw.cs.washington.edu/p19-zhang.pdf> (дата обращения: 01.09.2021).

90. Климов, В. В. Подход к прогнозированию пропускной способности канала связи / В. В. Климов, М. Н. Чепцов. – Текст : непосредственный // Вестник ДонНУ. – 2024. – № 3. – С. 119–125. – (Серия Г : «Технические науки»).

91. Performance analysis of cooperative wireless networks with unreliable backhaul links / T. A. Khan [et al.]. – Текст : непосредственный // IEEE Commun Lett. – 2015. – Vol. 19(8). – P. 1386–1389.

92. Чепцов, М. Н. Анализ критериев надежности беспроводной транспортной сети оператора мобильной связи / М. Н. Чепцов, В. В. Климов. – Текст : непосредственный // Вестник Академии гражданской защиты. – 2021. – Вып. 2(26). – С. 59–66.

93. Климов, В. В. Прогностическая модель дождевого затухания в мобильных транспортных сетях / В. В. Климов. – Текст : непосредственный // Информационное пространство Донбасса : проблемы и перспективы

материалы V Республиканской с международным участием научно-практической конференции. – Донецк : ДонНУЭТ, 2022. – С. 124–126.

94. Климов, В. В. Метод прогнозирования оценки размера буфера контроллера базовой станции / В. В. Климов, М. Н. Чепцов. – Текст : непосредственный // Проблемы искусственного интеллекта. – Донецк, 2020. – № 3(18). – С. 49–59.

95. Mu, M. A Utility-Based QoS Model for Emerging Multimedia Applications / M. Mu, A. Mauthe, F. Garcia. – Текст : непосредственный // The Second International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services, and Technologies. – 2008. – P. 521–528.

96. Климов, В. В. Разработка функций полезности использования сетевых ресурсов оператором связи / В. В. Климов. – Текст : непосредственный // Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2020) : сборник трудов XVIII Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Таганрог, 3–5 декабря 2020 г. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Изд-во Южн. федерал. ун-та, 2020. – Т. 1. – С. 44–49.

97. Климов, В. В. Разработка метода прогнозирования оценок качества работы транспортной сети мобильного оператора связи / В. В. Климов, М. Н. Чепцов. – Текст : непосредственный // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций : сборник научных трудов ; под ред. Ю. Б. Гимпилевича. – Москва ; Севастополь : Изд-ва : РНТОРЭС им. А. С. Попова, СевГУ, 2021. – № 4. – С. 164.

98. Климов, В. В. Обоснование метода прогнозирования оценок качества работы транспортной сети мобильного оператора связи / В. В. Климов. – Текст : непосредственный // Вестник Академии гражданской защиты. – 2021. – Вып. 4(28). – С. 69–74.

99. Климов, В. В. Обоснование комплексного показателя качества работы транспортной сети мобильного оператора связи / В. В. Климов, М. Н. Чепцов, В. Н. Лозинская. – Текст : непосредственный //



Вестник ДонНУ. – 2024. – № 4. – С. 175–182. – (Серия Г : «Технические науки»).

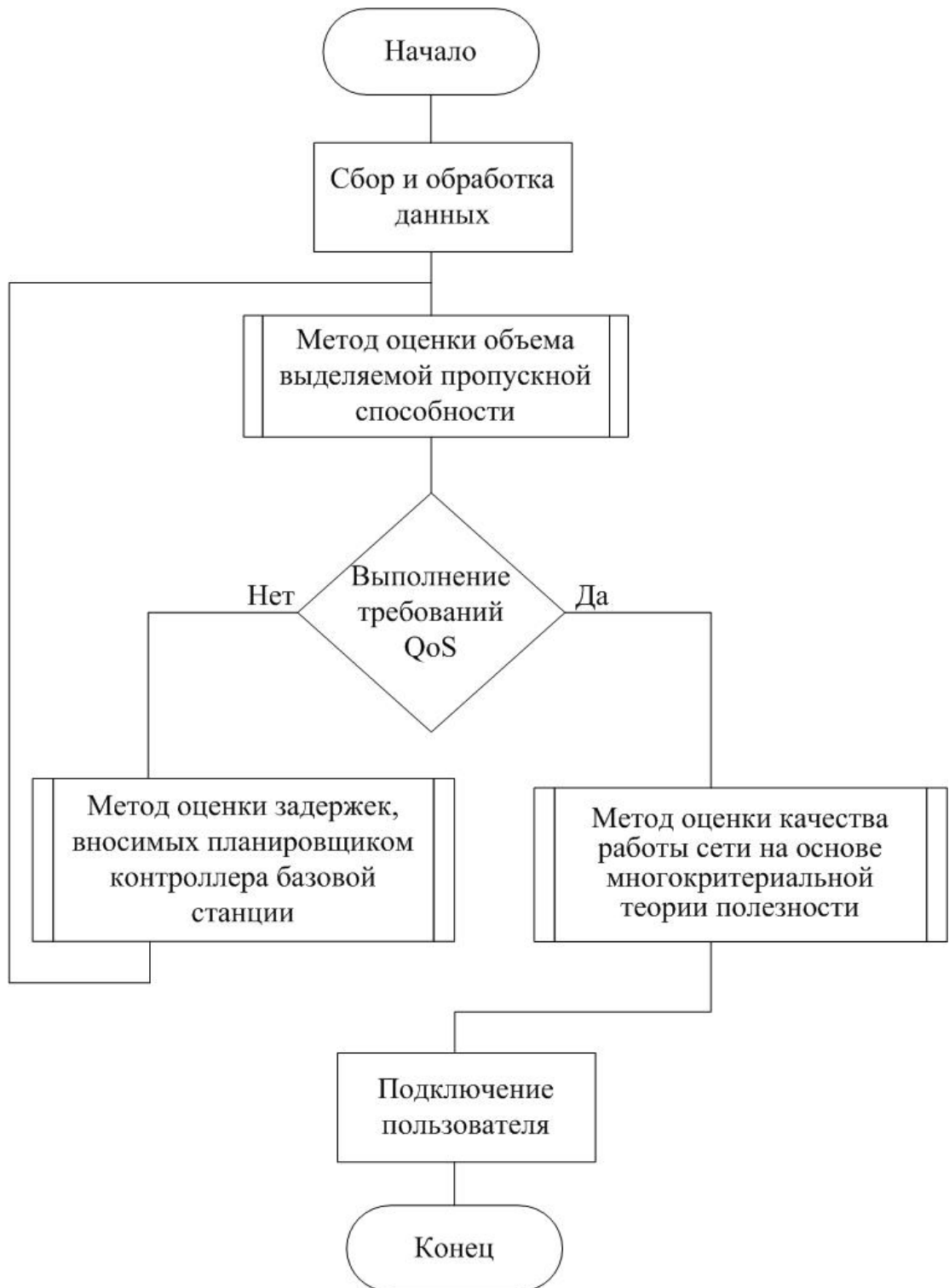
100. Стрелковская, И. В. Нахождение характеристик самоподобного трафика сети LTE с помощью программных продуктов / И. В. Стрелковская, А. Д. Балык. – Текст : непосредственный // Инфокоммуникации – современность и будущее : материалы десятой Международной научно-практической конференции. – Одесса : ОНАС, 2020. – С. 364–369.

101. Идентификация параметров ARFIMA модели фрактального процесса / И. В. Дегтяренко [и др.]. – Текст : непосредственный // Научные труды Донецкого национального технического университета. – Донецк : ДонНТУ, 2013. – Вып. 2(25). – С. 111–119. – (Серия : «Вычислительная техника и автоматизация»).

102. WireShark : [сайт]. – 2022. – URL: <https://www.wireshark.org/download.htm> (дата обращения: 11.10.2022). – Текст : электронный.

103. Климов, В. В. Метод распределения спектра оптической сети с обеспечением качества обслуживания / В. В. Климов. – Текст : непосредственный // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых : сборник научных трудов XXII Международной научно-технической конференции аспирантов и студентов, г. Донецк, 24–26 мая 2022 г. – Донецк : ДОННТУ, 2022. – С. 56–59.

## Приложение А

Блок-схема алгоритма прогнозирования оценок качества  
транспортной сети МОС

## Приложение Б

### Описание и листинги программ, предназначенных для моделирования гибридного метода прогнозирования качества работы транспортной сети

#### Основная программа

```

clc;
clear all;
prompt='Введите значение интервала агрегации для исходного трафика ';
int=input(prompt);
prompt='Введите исходное значение интервала статистики ';
stat=input(prompt);
prompt='Введите исходное значение интервала перераспределения ';
adj=input(prompt);
prompt='Введите размер выборки для исследования трафика ';
l=input(prompt);
prompt='Введите размер выборки для исследования временных интервалов ';
b=input(prompt);
t=importdata('nasa_jul.mat'); %ввод данных из файла
t1=agreg(int,t); %агрегирование трафика
t2=t1(1,1:l);
ls=length(t2); %длина агрегированной последовательности
algP_ab=zeros(1,b);
algKnm_ab=zeros(1,b);
k=stat;
%Исследование величины шагов дискретизации для алгоритмов
for i=1:b
    [ab]=wrk_algaub(t2,k,adj); %оценка пропускной способности по Классике
    [P1,algP_ab(1,i),utl1,algKnm_ab(1,i)]=PrognozErr(t2,ab); % качество работы алгоритма
    k=k+stat;
end
k=adj;
algP_ab1=zeros(1,b);
algKnm_ab1=zeros(1,b);
for i=1:b
    [ab]=wrk_algaub(t2,stat,k); %rasschet po algoritmam
    [P2,algP_ab1(1,i),utl2,algKnm_ab1(1,i)]=PrognozErr(t2,ab); % obrabotka resul'tatov
    k=k+adj;
end
min=1;
for i=1:b
    if algP_ab(1,i)<min,min=algP_ab(1,i); stat1=i; adj1=stat1*10;end
end
min=1;
for i=1:b
    if algP_ab1(1,i)<min,min=algP_ab1(1,i); stat2=stat; adj2=stat2*i;end
end
[ab]=wrk_algaub(t2,stat,adj);
[abmn,abm]=wrk_alMod(t2,stat,adj); % Моделирование оценок прогнозирования
[arF]=arFlma(t2,stat,adj); %ARFIMA прогнозирование
[mi,miMax]=ModInt(t2,stat,adj); %Интегрированная оценка
pl_abM=zeros(1,5);
PM=zeros(1,5);
knm_abM=zeros(1,5);

```

```

utlM=zeros(1,5);
NMSE=zeros (1,5);
sk(1,1)=std(ab);sk(1,2)=std(abm);sk(1,3)=std(arF);sk(1,4)=std(mi);sk(1,5)=std(miMax);
str=["Аналитическая модель","Максимальная модель","ARFIMA-модель","Интегральная
модель","Комбинированная модель"];
fig(1,:)=ab;
fig(2,:)=abm;
fig(3,:)=arF;
fig(4,:)=mi;
fig(5,:)=miMax;
for i=1:5
    figure(i);
    p=plot(1:ls,t2(1,1:ls),1:ls,fig(i,1:ls));
    p(2).LineWidth = 2;
    title(str(i));
    xlabel('Отсчеты');
    ylabel('Скорость передачи, Байт/отсчет');
    grid on;
    pause;
end
PM=zeros(5,l);
utlM=zeros(5,l);
[PM(1,:),pl_abM(1,1),utlM(1,:),knm_abM(1,1)]=PrognozErr(t2,ab); % Классический алгоритм
%[PM(2,:),pl_abM(1,2),utlM(2,:),knm_abM(1,2)]=PrognozErr(t2,abm); % Алгоритм со средним
значением
[PM(2,:),pl_abM(1,2),utlM(2,:),knm_abM(1,2)]=PrognozErr(t2,abm); % Алгоритм с максимальным
значением
[PM(3,:),pl_abM(1,3),utlM(3,:),knm_abM(1,3)]=PrognozErr(t2,arF); % Алгоритм ARFIMA
[PM(4,:),pl_abM(1,4),utlM(4,:),knm_abM(1,4)]=PrognozErr(t2,mi);% Алгоритм интегральный
[PM(5,:),pl_abM(1,5),utlM(5,:),knm_abM(1,5)]=PrognozErr(t2,miMax);% Алгоритм интегральный с
максимальным значением
MAPE(1,:)=(1-knm_abM(1,:)).*100;
figure(6);
cat=categorical({'Аналитическая модель','Максимальная модель','ARFIMA-модель','Интегральная
модель','Комбинированная модель'});
bar(cat,pl_abM(1,:));
title('Вероятность потерь');
ylabel('P');
grid on;
pause;
figure(7);
cat=categorical({'Аналитическая модель','Максимальная модель','ARFIMA-модель','Интегральная
модель','Комбинированная модель'});
bar(cat,MAPE(1,:),'g');
title('Точность прогнозирования');
ylabel('MAPE');
grid on;
figure (8);
plot([1:1:1440],t1(1:1440),'k');
grid on;
xlabel('Отсчеты');
ylabel('Генерируемый трафик, Бит/отсчет');

```

### Функция, реализующая алгоритм агрегации трафика

```

function Traf=agreg(int,IntDat)
%int - stepen' agregatsii
% IntDat - ishodnii potok
t=length(IntDat);
ts=t(1,1);
if mod(ts,int)~=0,q=floor(ts/int); ts=q*int; end;

```

```

if mod(ts,int)==0,q=ts/int; end;
for i=1:q
    p=floor((i-1)*int+1);
    n=floor(i*int);
    Traf(1,i)=mean(IntDat(p:n));
end
end

```

Функция, реализующая функционирования аналитического алгоритма

```

function [ab]=wrk_algaub(Traf,stat,adj)
%функционирование аналитического алгоритма
ts=length(Traf);
if mod(ts,stat)~=0,q=floor(ts/stat); ts=q*stat; end
if mod(ts,stat)==0,q=ts/stat; end
ab=zeros(1,ts);
qq=floor(ts/adj);
ab_=zeros(1,qq);
ab_(1,1)=max(Traf(1,1:stat));
for i=1:qq-1
    p=i*adj+1;
    n=(i+1)*adj;
    ab_(1,i+1)=max(Traf(1,p:n));
    ab(1,p:n)=ab_(1,i);
end
ab(1,1:adj)=max(Traf(1,1:stat));
end

```

Функция, реализующая алгоритм моделирования оценок  
прогнозирования

```

function [P,Pl,erp,MAPE]=PrognozErr(Traf,algT) %
k=length(algT);
erp=zeros(1,k);
P=zeros(1,k);
s1=0;
s=0;
for i=1:k
    if Traf(1,i)<=algT(1,i)
        P(1,i)=0;
        erp(1,i)=(algT(1,i)-Traf(1,i))/algT(1,i);
    end
    if Traf(1,i)>algT(1,i)
        P(1,i)=1;
        erp(1,i)=(Traf(1,i)-algT(1,i))/Traf(1,i);
    end
end
Pl=1/k*sum(P);
MAPE=1/k*sum(erp);
end

```

Функция, реализующая функционирования алгоритма максимальных и  
средних значений

```

function [abmn,abm]=wrk_alMod(Traf,stat,adj)

```

```

ts=length(Traf);
if mod(ts,stat)~=0,q=floor(ts/stat); ts=q*stat; end;
if mod(ts,stat)==0,q=ts/stat; end;
abmn=zeros(1,ts);
abm=zeros(1,ts);
av_mean=zeros(1,q);
av_max=zeros(1,q);
for i=1:q
    p=floor((i-1)*stat+1);
    n=floor(i*stat);
    av_mean(1,i)=mean(Traf(p:n));
    av_max(1,i)=max(Traf(p:n));
end
for i=1:q-1
    p=i*stat+1;
    n=(i+1)*stat;
    abm(1,p:n)=av_max(1,i);
    abmn(1,p:n)=av_mean(1,i);
end
qq=floor(ts/adj);
ab_mn=zeros(1,qq);
ab_m=zeros(1,qq);
p=0; n=0;
for i=1:qq-1
    p=i*adj+1;
    n=(i+1)*adj;
    ab_mn(1,i+1)=mean(abmn(1,p:n));
    ab_m(1,i+1)=mean(abm(1,p:n));
    abmn(1,p:n)=ab_mn(1,i);
    abm(1,p:n)=ab_m(1,i);
end
abmn(1,1:adj)=mean(Traf(1:stat));
abm(1,1:adj)=max(Traf(1:stat));

```

### Функция, реализующая алгоритм ARFIMA-прогнозирования

```

function [arF]=arFIma(T,stat,adj)
%ArF- sprognozirovannii potok; T- ishodnii potok (agregirovanni); stat -
%velichina intervala statistiki; adj - interval ypravleniya
ts=length(T);
if mod(ts,stat)~=0,q=floor(ts/stat); ts=q*stat; end
if mod(ts,stat)==0,q=ts/stat; end
t_m=zeros(1,q);
arF=zeros(1,q);
for i=1:q
    p=floor((i-1)*stat+1);
    n=floor(i*stat);
    t_m(1,i)= max(T(1,p:n));
end
pp=adj/stat;
qadi=floor(ts/adj);
for i=1:qadi-1
    prev=floor((i-1)*pp+1);
    next=floor(i*pp);
    Y1(1,prev:next)=ARFIMA_SIM(pp,4,4,0.25,[],t_m(prev:next));
end
if length (Y1) ~= length(t_m),
    if length(Y1)<length(t_m), f=length(Y1); end
    if length(Y1)>length(t_m), f=length(t_m); end
end
if length (Y1) == length(t_m), f=length(Y1); end

```

```

for i=1:f
    Y(1,i)=Y1(1,i);
end
for i=2:qadi
    prev=(i-1)*adj+1;
    next=i*adj;
    arF(prev:next)=Y1(1,i-1);
end
arF(1,1:adj)=mean(t_m(1:pp));
end

```

### Функция, реализующая алгоритм интегральной оценки

```

function [mi,mim]=ModInt(Traf,stat,adj)
ts=length(Traf);
if mod(ts,stat)~=0,q=floor(ts/stat); ts=q*stat; end
if mod(ts,stat)==0,q=ts/stat; end
m_m=zeros(1,q);
pp=adj/stat;
qq=floor(ts/adj);
for i=1:qq
    p=(i-1)*adj+1;
    n=i*adj;
    m_m(1,p:n)=max(Traf(1,p:n));
end
m_=zeros(1,qq);
mm_=zeros(1,qq);
mim=zeros(1,q);
mi=zeros(1,q);
for i=1:qq
    p=(i-1)*adj+1;
    n=i*adj;
    mm_(1,p:n)=ARFIMA_SIM(adj,4,4,0.25,[],m_m(1,p:n)); % моделирование согласно ARFIMA для
    максимального значения
    m_(1,p:n)=ARFIMA_SIM(adj,4,4,0.25,[],Traf(1,p:n)); % моделирование согласно ARFIMA
    mi(1,p:n)=1/2*(m_(1,p)+m_(1,n));
    mim(1,p:n)=(1/2*(mm_(1,p)+mm_(1,n)))*0.72;
end
end

```

### Функция, реализующая работу гибридного планировщика очередей

```

function [W1,B1m]=LLQ_TEG1(U)
clc;
q1=0.1;
q2=0.2;
q3=0.3;
A0=mp_zeros(8,8);
A0(1,8)=q1;
A0(2,1)=mp_eye; A0(3,2)=q2; A0(4,3)=mp_eye;
A0(5,4)=mp_eye; A0(6,5)=q3; A0(7,6)=mp_eye;
A0(8,7)=mp_eye;
A0_star=mp_star(A0);
A1=mp_zeros(8,8);
A0_starA1=mp_multi(A0_star,A1);
A2 = mp_zeros(8,8);
A0_starA2=mp_multi(A0_star,A2);
A3=mp_zeros(8,8); A3(3,4)=mp_eye;
A0_starA3=mp_multi(A0_star,A3);
A4=mp_zeros(8,8);

```

```

A0_starA4=mp_multi(A0_star,A4);
A5 = mp_zeros(8,8);
A0_starA5 = mp_multi(A0_star,A5);
A6 = mp_zeros(8,8); A6(4,5)=mp_eye;
A0_starA6 = mp_multi(A0_star,A6);
e1=0.3; e2=2; e3=3;
B0=mp_zeros(8,3);
B1=mp_zeros(8,3);
B0(4,1)=mp_eye;
B0(7,2)=mp_eye;
B1(2,1)=e1;
B1(5,2)=e2;
B1(8,3)=e3;
A0_starB0 = mp_multi(A0_star,B0);
A0_starB1 = mp_multi(A0_star,B1);
N = mp_zeros(8,8);
E = mp_eye(8,8);
A=[A0_starA1 N N N N N ;
    N A0_starA2 N N N N ;
    N N A0_starA3 N N N ;
    N N N A0_starA4 N N ;
    N N N N A0_starA5 N;
    N N N N N A0_starA6];
N1=mp_zeros(8,3);
B0m=[A0_starB0;N1;N1;N1;N1;N1];
B1m=[A0_starB1;N1;N1;N1;N1;N1];
u1=mp_ones(3,50);
du1 = mp_ones(1,50);
du1(1,:) = -1.2*log(rand(1,50));
l=length(U);
u(:,1:l)=U(:,1:l);
for i = 2:l
    u1(1,i) = mp_multi(u(1,i),e1);
    u1(2,i) = mp_multi(u(2,i),e2);
    u1(3,i) = mp_multi(u(3,i),e3);
end;
w0 = mp_zeros(48,1);
W(:,1) = w0;
W(:,2) = w0;
W(:,3) = w0;
for k = 2:l
    W(:,k) = mp_sum(mp_multi(A,W(:,k-1)),mp_multi(B0m,u(:,k))); %vremena postuplenii
end;
f0 = mp_zeros(48,1);
F(:,1) = f0;
F(:,2) = f0;
F(:,3) = f0;
for k = 2:l
    F(:,k) = mp_sum(W(:,k),mp_multi(B1m,u1(:,k))); %vremena osvobogdenii
end;
%markirovka sistemi
DGX=zeros(7,30);
DGX(1,1:29)=F(8,1:29);
DGX(2,1:29)=F(5,1:29);
DGX(3,1:29)=W(1,1:29)+e1;
DGX(4,1:29)=u(1,1:29);
DGX(5,1:29)=W(7,1:29);
DGX(6,1:29)=W(4,1:29);
DGX(7,1:29)=W(1,1:29);
time_markf = [0.3 0.3 0.3 0.1 0.3 0.3 0.3]';
figure(10);
axes('YTickLabel', 'X8(k)|X5(k)|X2(k)|u(:)|X7(k)|X4(k)|X1(k)| '); %x_1(k)|x_2(k)|x_1(k)|x_2(k-1)|
mp_ganttx(DGX(:,2:25), time_markf, [0 15]);

```



```

W1=zeros(8,l);
W1(1,1:l)=W(1,1:l);
W1(2,1:l)=W(1,1:l)+e1;
W1(3,1:l)=W(3,1:l);
W1(4,1:l)=W(4,1:l);
W1(5,1:l)=F(5,1:l);
W1(6,1:l)=W(6,1:l);
W1(7,1:l)=W(7,1:l);
W1(8,1:l)=F(8,1:l);
end

```

Функция, реализующая работу планировщика со взвешенным обслуживанием

```

function [W]=WFQ_TEG(U)
clc;
q1=0.2;
q2=0.3;
q3=0.4;
A0=mp_zeros(9,9);
A0(1,9)=q1;
A0(2,1)=mp_eye; A0(3,2)=mp_eye; A0(4,3)=q2;
A0(5,4)=mp_eye; A0(6,5)=mp_eye; A0(7,6)=q3;
A0(8,7)=mp_eye; A0(9,8)=mp_eye;
A0_star=mp_star(A0);
A1=mp_zeros(9,9);
A0_starA1=mp_multi(A0_star,A1);
A2 = mp_zeros(9,9);
A0_starA2=mp_multi(A0_star,A2);
A3=mp_zeros(9,9); A3(1,2)=mp_eye;
A0_starA3=mp_multi(A0_star,A3);
A4=mp_zeros(9,9);
A0_starA4=mp_multi(A0_star,A4);
A5 = mp_zeros(9,9);
A0_starA5 = mp_multi(A0_star,A5);
A6 = mp_zeros(9,9); A6(4,5)=mp_eye;
A0_starA6 = mp_multi(A0_star,A6);
A7 = mp_zeros(9,9);
A0_starA7 = mp_multi(A0_star,A7);
A8 = mp_zeros(9,9);
A0_starA8 = mp_multi(A0_star,A8);
A9 = mp_zeros(9,9); A6(9,9)=mp_eye;
A0_starA9 = mp_multi(A0_star,A9);
e1=1; e2=2; e3=3;
B0=mp_zeros(9,1); B0(2,1)=mp_eye; B0(5,1)=mp_eye; B0(8,1)=mp_eye;
B1=mp_zeros(9,1); B1(4,1)=e1; B1(6,1)=e2; B1(9,1)=e3;
A0_starB0 = mp_multi(A0_star,B0);
A0_starB1 = mp_multi(A0_star,B1);
N = mp_zeros(9,9);
E = mp_eye(9,9);
A=[A0_starA1 N A0_starA3 N N N N N;
  E N N N N N N N;
  N E N N N N N N;
  N N N N N A0_starA6 N N N;
  N N N E N N N N;
  N N N N E N N N;
  N N N N N N N A0_starA9;
  N N N N N N E N N;
  N N N N N N N E N];
N1=mp_zeros(9,1);

```

```

B0m=[A0_starB0;N1;N1;N1;N1;N1;N1;N1;N1;N1];
B1m=[A0_starB1;N1;N1;N1;N1;N1;N1;N1;N1;N1];
u1=mp_ones(1,50);
du1 = mp_ones(1,50);
du1(1,:) = -1.2*log(rand(1,50));

u(1,1:50)=U(1,1:50);
for i = 2:50
    u1(1,i) = U(1,i)+u1(1,i-1)+du1(1,i);
end;
w0 = mp_zeros(81,1);
W(:,1) = w0;
for k = 2:30
    W(:,k) = mp_sum(mp_multi(A,W(:,k-1)),mp_multi(B0m,u(1,k))); %vremena postuplenii
end;
f0 = mp_zeros(81,1);
F(:,1) = f0;
for k = 2:30
    F(:,k) = mp_sum(W(:,k),mp_multi(B1m,u1(1,k))); %vremena osvobogdenii
end;
%markirovka sistemi
DGX=zeros(7,30);
%vremena osvobogdenii
for i=1:3
    DGX(i,1:29)=F(3*i,1:29);
end;
DGX(4,1:29)=u(1,2:30);
%vremena postuplenii
for i=5:7
    t=3*(i-5)+2;
    DGX(i,1:29)=W(t,1:29);
end;
time_markf = [1 1 1 0.2 1 1 1];

```

## **Приложение В**

**Документы, подтверждающие эффективность использования  
результатов работы**



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"  
(ФГБОУ ВО "ДонНТУ")**

Артёма ул., 58, г. Донецк, г.о. Донецк, Донецкая Народная Республика, 283001 тел.: +7 (856) 337-17-33, 301-07-69  
e-mail: donntu.info@mail.ru ОКПО 95580141 ОГРН 1229300078633 ИНН/КПП 9303013012/930301001

29.08.2025 № 30-12/64

На № \_\_\_\_\_

Диссертационный совет 24.2.491.03  
при ФГБОУ ВО «Донецкий  
национальный технический  
университет»

**СПРАВКА**

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Климова Владимира Владимировича на тему: «Обоснование метода прогнозирования оценок качества работы транспортной сети оператора мобильной связи», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки) в учебный процесс ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»

Результаты диссертационных исследований Климова В.В., а именно: метод прогнозирования оценки пропускной способности транспортной сети и рекомендации по практическому использованию предложенных решений внедрены в учебный процесс при проведении лабораторных работ по дисциплине «Математическое моделирование устройств и систем» и «Математические модели сигналов и помех» для студентов направления подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», что отражено в учебных программах вышеуказанных дисциплин.

Проректор  
д-р техн. наук, профессор

А. Б. Бирюков

Начальник учебного отдела  
канд. техн. наук, доцент

В. А. Попов

Заведующий кафедрой «Автоматика и телекоммуникации»  
канд. техн. наук, профессор

В. В. Турупалов





**МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ  
ГОСУДАРСТВЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ,  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СВЯЗИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ «УГЛЕТЕЛЕКОМ»**

ОГРН 1229300073628  
ИНН 9303011791  
КПП 930301001

283001, Донецкая Народная Республика,  
г.о. Донецк, г.Донецк,  
ул. Постышева, д.60,  
приемная: тел. (856) 300-30-48  
E-mail: ugletelecom@ugletelecom.com

27.08.2025 № 1314/02

Диссертационный совет

**СПРАВКА**

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Климова Владимира Владимировича на тему: «Обоснование метода прогнозирования оценок качества работы транспортной сети оператора мобильной связи», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки) на ГУП ДНР «УГЛЕТЕЛЕКОМ»

Результаты диссертационных исследований Климова В.В., а именно: метод прогнозирования оценки пропускной способности транспортной сети и метод оценки размера буферов очередей контроллера базовой станции, рекомендации по практическому использованию предложенных методов внедрены в производственный процесс ГУП ДНР «УГЛЕТЕЛЕКОМ».

Директор ГУП ДНР «УГЛЕТЕЛЕКОМ»



А.Г. Хижный