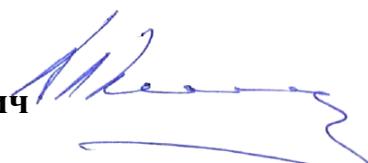


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Донецкий национальный технический университет»

*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)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Донецк – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**ЛОЗИНСКАЯ Виктория Николаевна**  
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк), доцент кафедры «Автоматика и телекоммуникации»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, старший научный сотрудник  
**СОКОЛОВ Николай Александрович,**  
Санкт-Петербургский филиал федерального государственного автономного учреждения «Национальный исследовательский центр телекоммуникаций имени М. И. Кривошеева»  
(г. Санкт-Петербург), начальник инженерно-технической лаборатории

кандидат технических наук, доцент  
**СТЕПАНОВ Михаил Сергеевич,**  
Ордена Трудового Красного Знамени  
ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики» (г. Москва), доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донецкий государственный университет» (г. Донецк)

Защита состоится «12» февраля 2026 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.491.03 при ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, корп. 1, ауд. 203.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ДонНТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, корп. 2. Адрес сайта университета: <http://donntu.ru>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.2.491.03  
д-р техн. наук, профессор



А.О. Новиков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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., Вох 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 Vasselli 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.

**Цель 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, формирующего комплексный показатель.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи.

1. Проанализировать состояние решения проблемных вопросов в области прогнозирования оценок 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 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «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.

**Научные 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 базе 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».

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.

**Личный вклад соискателя.** Все результаты и положения, составляющие основное содержание диссертации, вынесенные на защиту, получены автором самостоятельно. Личный вклад соискателя заключается в обосновании идеи работы и ее реализации, цели и задач работы, в выборе методов и направлений исследований, выполнении теоретических, аналитических и экспериментальных исследований, разработке положений и методических рекомендаций по использованию результатов работы.

**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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, проведен краткий обзор и анализ научной и технической литературы по теме диссертации, сформулирована цель и задачи исследований, представлена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

**В первом разделе «Анализ состояния решения проблемных вопросов в области прогнозирования оценок качества работы транспортной сети оператора мобильной связи, обоснование актуальности темы и цели исследования»** обоснована актуальность проведения научных изысканий в области повышения эффективности прогнозирования оценки качества работы транспортной сети мобильного оператора связи. Для этого сделан и представлен анализ существующих методов и алгоритмов прогнозирования оценок качества работы транспортной сети мобильного оператора связи.

Транспортная сеть МОС является сложной технической системой, целью которой является передача информации от контроллера базовой станции к магистральной сети и обратно с определенным уровнем качества обслуживания.

С другой стороны, 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 МОС, включая оборудование и линии связи. Несвоевременная реакция на вышеперечисленное, при высоких скоростях

передачи, приводит к тому, что транспортная сеть МОС становится «узким местом». Отмечено, что решением проблемы может быть либо распределение имеющихся ресурсов, либо использование дополнительных, полученных за счет внедрения новых технологий связи. Следовательно, принятие решения о том, что необходимо управление ресурсами транспортной сети МОС должно основываться на определенных критериях эффективности ее работы.

Основным критерием качества работы транспортной сети МОС является обеспечение параметров качества обслуживания, что включает в себя обширный класс механизмов, успешное внедрение которых позволяет максимально улучшить производительность и обеспечить стабильное функционирование приложений.

В данной научно-исследовательской работе, в качестве оценок качества работы транспортной сети МОС, используются:

- 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;
- уровень потерь пакетов ( $Pl_i$ ), определяет количество пакетов, отбрасываемых во время передачи трафика;
- 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 ( $R_i$ ).

Особенность определения первых трех оценок качества 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 до необходимости знания о топологии имеющейся сети. 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 оценок 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.

**Во втором разделе «Анализ и разработка прогностических и математических моделей метода прогнозирования»** исследуются математические модели с целью выявления адекватного описания процесса для усовершенствования прогностических моделей оценок качества работы транспортной сети МОС.

В разделе представлен анализ трафика транспортной сети МОС, который выявил, что трафик являет собой нестационарный процесс с выраженной цикличностью, долгосрочными зависимостями и высокой самоподобностью, т.е., возможностью прогнозирования. Зная оценки поступающего трафика, прогнозируются оценки величины выделяемой пропускной способности. В технических средствах реализована аналитическая модель прогнозирования оценки величины выделяемой пропускной способности, реализующая метод экспоненциального сглаживания. К основным недостаткам этой модели относятся несовершенство оценки прогнозируемой величины и медленная скорость адаптации

к интенсивности поступающего трафика. Каждый из вышеперечисленных недостатков вносит свою долю погрешности в оценку пропускной способности. Для ослабления этих недостатков в работе предложены модификации прогностических моделей, учитывающих особенности трафика транспортной сети МОС.

Для формализации модели прогнозирования оценок величины выделяемой пропускной способности, определены следующие параметры:

- текущая оценка величины пропускной способности ( $b_j(\Delta\tau)$ ) для прогнозирования оценки величины 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.

При этом алгоритм прогнозирования должен решать следующую задачу: для некоторого потока трафика  $c_j(i)$ , где  $j$  – сервис, а  $i$  – последовательность временных отсчетов, в которые производилась оценка трафика, необходимо оценить величину выделяемой пропускной способности ( $b_j(\Delta\tau)$ ), который, с обеспечением заданных параметров качества обслуживания, в течение времени ( $\Delta\tau$ ) будет удовлетворять пользователя. Тогда оценка величины выделяемой пропускной способности  $b_j(m\Delta\tau)$  в пределах интервала перераспределения  $\Delta\tau$  определяется согласно выражению (1):

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

где  $k$  – число статистических интервалов в одном интервале перераспределения;  $m$  – номер интервала перераспределения;  $c_j(i\Delta t)$  – средняя интенсивность  $j$ -го потока трафика на  $i$ -м статистическом интервале. Последняя формируется на основе средней оценки интенсивности потока трафика на  $i$ -м статистическом интервале длиной в  $\Delta t$ , (2).

$$c_j(i\Delta t) = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n \lambda_j((i(n-1) + l)\Delta t), \quad (2)$$

где  $n$  – число измерений трафика за статистический интервал  $\Delta t$ ;  $\lambda_j(it)$  – мгновенная интенсивность трафика в момент времени  $it$ .

Оценка величины выделяемой пропускной способности осуществляется согласно выражению (1) при условии свободного канального ресурса (3), т.е.

$$\sum_{j=1}^N b_j(m\Delta\tau) < C, \quad (3)$$

где  $C$  – пропускная способность физического канала;  $N$  – количество каналов с заданной пропускной способностью, в одном физическом.

Расчетная формула средней абсолютной процентной ошибки прогнозирования видоизменена, исходя из логики математической модели, (4):

$$MAPE = \frac{1}{M} \sum_{l=1}^M ErP_j((n-l)\Delta\tau), \quad (4)$$

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

В работе, кроме алгоритма на основе аналитической модели, исследованы предложенные модификации:

1) в математической модели «Максимальные значения в пределах интервала статистики» формула (2) трансформируется в выражение (5)

$$c_j(i\Delta t) = \max_{l=1..n}(\lambda_j((i(n-1)+l)t)); \quad (5)$$

2) в модели «Прогностическая ARFIMA-модель», вместо выражения (1) используется выражение (6)

$$b_j(m\Delta\tau) = \max_{i=1..k}(ARFIMA(c_j((m(k-1)+i)\Delta t))) \quad (6)$$

где  $ARFIMA(c_j((m(k-1)+i)\Delta t))$  – значение оценок интенсивности поступающего трафика, спрогнозированных согласно ARFIMA-модели;

3) «Интегральная модель» предполагает оценку величины выделяемой пропускной способности согласно выражению (7)

$$b_j(m\Delta\tau) = \frac{\int_{(m-1)\Delta\tau}^{m\Delta\tau} c_j^*(m)\Delta\tau}{\Delta\tau}, \quad (7)$$

где  $c_j^*(m\Delta\tau)$  – прогнозируемые значения интенсивности трафика  $j$ -го сервиса для  $m$ -го интервала перераспределения, рассчитанного по следующему выражению (8):

$$c_j^*(m\Delta\tau) = ARFIMA(c_j(m(k-1)+i)\Delta\tau); \quad (8)$$

4) «Модель с адаптивным интервалом перераспределения». Для этой модели начало и конец интервала перераспределения определяется согласно функции приращения скорости изменения трафика ( $Q(m\Delta\tau)$ ), которая рассчитывается, как (9):

$$Q(m\Delta\tau) = \frac{c_j^*(m\Delta\tau) - c_j^*((m-1)\Delta\tau)}{c_j^*(m\Delta\tau)}. \quad (9)$$

Если функция приращения скорости меняет знак на противоположный, то фиксируется начало интервала перераспределения. Конец интервала перераспределения равен моменту времени, когда функция приращения меняет свой

знак второй раз подряд. Расчет величины выделяемой пропускной способности осуществляется согласно выражению (6).

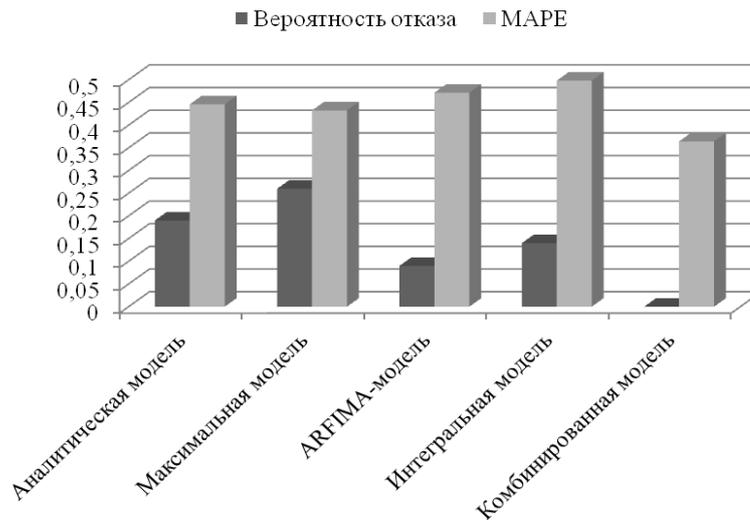


Рисунок 1 – Результаты работы моделей прогнозирования оценки величины выделяемой пропускной способности

Проведено имитационное моделирование работы данных моделей. В качестве оценок использовались такие показатели, как величина утилизации каналов связи и уровень потерь пакетов (рисунок 1). 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.

Поэтому в работе, с целью достижения заданного уровня показателей качества, предложено провести его модификацию. Для описания данного механизма, разработана математическая модель планировщика пакетов на базе аппарата 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 (10):

$$F(k+1) = \max \{ F(k), V(a(k+1)) \} + \frac{L(k+1)}{r}, \quad (10)$$

где  $F$  – вектор-столбец значений функции «виртуальное время», которая описывает время окончания обслуживания, размерностью  $N \times 1$ ;  $N$  – количество «бэклог»-потоков;  $V$  – матрица, размерности  $N \times N$ , характеризующая значение функции «виртуальное время», которая описывает время поступления пакетов в очереди классификатора;  $r$  – константа, характеризующая оценку пропускной способности,

которая выделяется для  $N$  «бэклог»-потоков;  $L(k+1)$  – вектор-столбец, которая характеризует размер пакетов, поступающих в очереди классификатора.

Задержку на обработку пакета можно формализовать в виде (11):

$$Dc = \tilde{V}(a(k+1)) - V(a(k+1)) \quad (11)$$

с ограничениями (12):

$$Dc < D_{QoS}, \sum_{i=1}^N b_i^{bix} \leq C, \quad i=1,2,\dots,N, \quad (12)$$

где  $\tilde{V}(a(k+1))$  – функция «виртуальное время» поступления пакетов в очереди для эталонного трафика;  $D_{QoS}$  – вектор параметров качества обслуживания для потоков трафика;  $b_i^{bix}$  – оценки величины выделяемой пропускной способности;  $C$  – пропускная способность физического канала.

Определение величины  $\tilde{V}(a(k+1))$  основано на (10), переписанном в терминах Max-plus  $(\overline{R}, \oplus, \cdot)$  алгебры (13):

$$\tilde{V}(a(k+1)) = \frac{L(k+1)}{r} \otimes' \tilde{F}(k+1), \quad (13)$$

где  $\tilde{F}(k+1)$  – вектор-столбец значений функции «виртуальное время» окончания обслуживания для эталонного трафика.

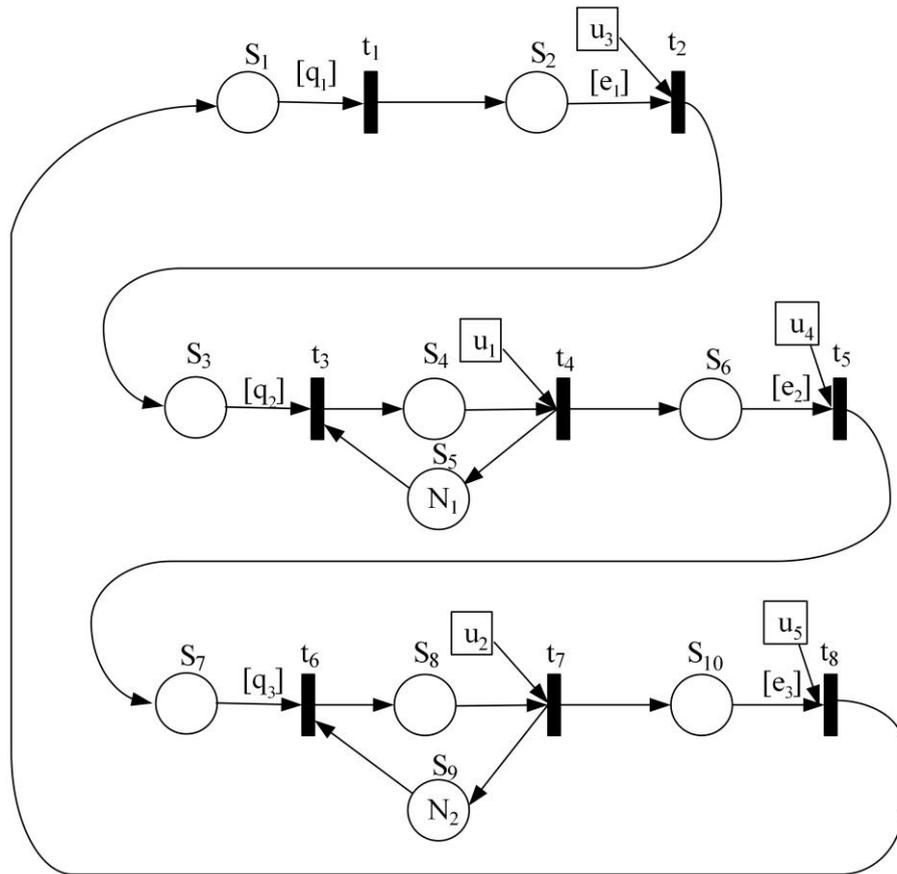
В следующем разделе, на основе предложенных математических моделей разработан гибридный метод прогнозирования, позволяющий повысить точность.

**В третьем разделе «Обоснование метода прогнозирования оценок качества работы транспортной сети МОС»** представлена разработка и описание методов прогнозирования основных характеристик работы транспортной сети МОС и обоснование комплексного показателя качества работы транспортной сети МОС.

Метод оценки задержки, вносимой планировщиком, основан на работе модели планировщика с гибридной дисциплиной обслуживания. Дискретно-событийный граф данной модели приведен на рисунке 2.

Работу этого графа можно описать следующим образом. 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  $x_i(k)$ .



- $t_1$ - 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 очередей;
- $q_2, q_3$ - 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;
- $u_i$ - управляющие воздействия;
- $S_i$ - события, формирующие процесс работы планировщика.

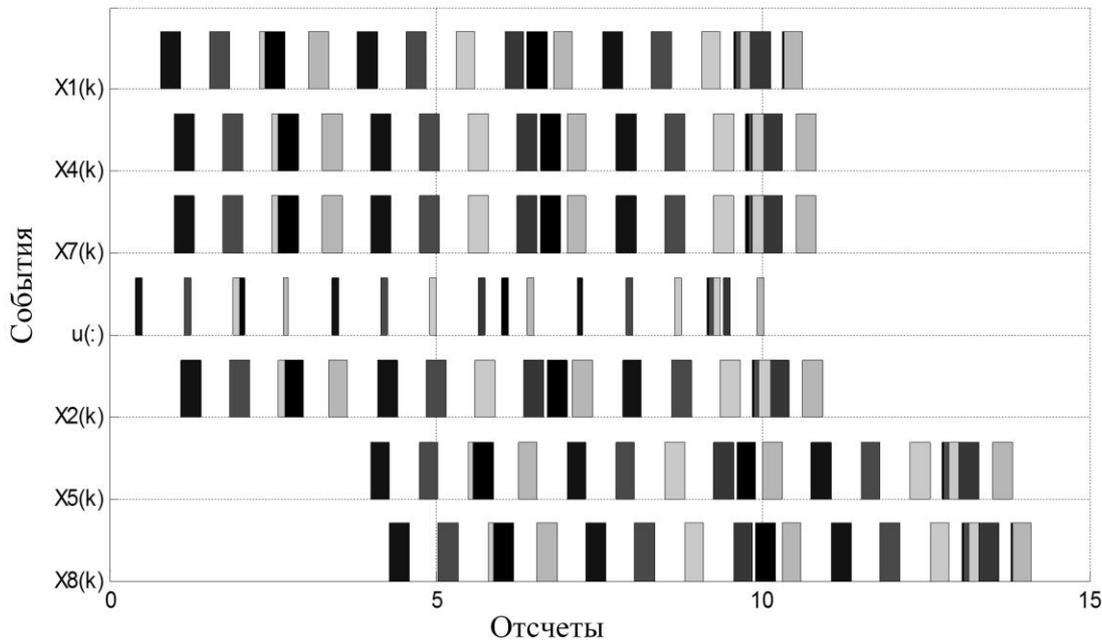
Рисунок 2 – Временно-событийный граф работы планировщика с гибридным обслуживанием очередей с несколькими управляемыми переходами

Получено уравнение срабатывания переходов, которое приведено к следующему выражению в пространстве состояний (14):

$$x(k+1) = A \cdot x(k) \oplus B_0 \cdot u(k) \oplus B_1 \cdot u_1(k). \quad (14)$$

Для анализа адекватности предложенной модели получена диаграмма Ганта (рисунок 3). 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.



- $X1(k)$  – моменты времени поступления пакетов в приоритетную очередь;  
 $X2(k)$  – моменты времени поступления пакетов в сеть из приоритетной очереди;  
 $X5(k), X8(k)$  – моменты времени поступления пакета в сеть из 1 и 2-й очередей соответственно;  
 $X4(k), X7(k)$  – моменты времени поступления пакетов в буферы 1-й и 2-й очередей соответственно;  
 $u(:)$  – моменты времени поступления управляющих воздействий.

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

Здесь представлены моменты поступления пакетов в каждую из очередей и их освобождение. Это позволяет формализовать метод оценки размера буфера к решению уравнения (15):

$$x(k+1) = W \oplus B_1 \cdot u_1(k). \quad (15)$$

Решая это уравнение относительно  $W$ , можно получить:

- точную оценку размера буфера (16), если  $W < x(k+1)$ , то  $B_1 \cdot u_1(k) = x(k+1)$

$$u_1(k) = B_1^{-T} \cdot x(k+1); \quad (16)$$

- грубую оценку, если  $W = x(k+1)$ , то  $B_1 \cdot u_1(k) \leq x(k+1)$ ;
- вектор оценок размеров буферов вычисляется согласно (16).

Ограничения по качеству обслуживания учтены в модели векторами  $e$  и  $q$ .

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

эффективности ее работы. В случае нахождения терминального оборудования в зоне действия нескольких базовых станций, на основе полученных оценок эффективности транспортной сети МОС, принимается решение о том к которой именно базовой станции необходимо подключить это оборудование. Для учета вышеперечисленного представлено обоснование метода прогнозирования оценок качества работы транспортной сети МОС, сущность которого раскрывается соответствующей блок-схемой алгоритма (рисунок 4).



Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма прогнозирования оценок качества транспортной сети МОС

Для обоснования гибридного метода прогнозирования оценок качества в работе предложено использовать многокритериальный показатель качества работы транспортной сети МОС. Чтобы получить комплексную оценку разнородных критериев эффективности, необходимо сделать 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.

Для трафика передачи голоса функция «полезности» получаемой услуги в зависимости от изменения величины оценки задержки выглядит, как (17):

$$U_{VoIP}(d) = \begin{cases} 100 - \gamma_1 d, & d < c_1 \\ b_1 \tanh(\beta(\chi - b_2)) + b_3, & c_1 \leq d \leq c_2 \\ \delta - \gamma_2 d, & d > c_2 \end{cases} \quad (17)$$

где,  $d$  – оценка задержки;  $\gamma_i$  – коэффициенты, отражающие свойства ухудшения качества в каждой области;  $c_i$  – заданные пороги;  $b_i$  – параметры настройки для обеспечения непрерывности между областями;  $\beta$ ,  $\delta$  – коэффициенты, отражающие технологические требования.

В работе предложена модификация метода многокритериальной теории полезности. Данная модификация объединяет в себе расчет комплексного критерия качества работы транспортной сети МОС и процедуру выбора оптимального подключения пользователя, среди возможных. Критерий качества работы транспортной сети МОС – комплексная мера, содержащая две составляющие: композитную функцию «полезности» и функцию производительности, (18) - (20)

$$U = U_{QoS} \cdot U_{prf}, \quad (18)$$

$$U_{QoS} = U_B(B) \cdot U_D(D) \cdot U_{Pl}(Pl), \quad (19)$$

$$U_{prf} = R \cdot Util, \quad (20)$$

где  $U_{QoS}$  – композитная функция «полезности»;  $U_{prf}$  – функция производительности;  $U_B(B), U_D(D), U_{Pl}(Pl)$  – функции «полезности» для пропускной способности, задержки, вероятности потерь соответственно;  $Util$  – оценка утилизации канала и  $R$  – оценка надежности транспортной сети.

Для (19) действуют следующие выражения и ограничения (21):

$$\begin{aligned} U_B(B) &\rightarrow 1, \text{ при } B \leq B_{\max}; \\ U_D(D) &\rightarrow 1, \text{ при } D < D_{\text{дон}}; \\ U_{Pl}(Pl) &\rightarrow 1, \text{ при } Pl < Pl_{\text{дон}}, \end{aligned} \quad (21)$$

где допустимые и максимальные значения выбираются согласно технологии используемой МОС.

Значение (21) будет принимать максимальное «единица», если все параметры QoS удовлетворяют требованиям для этой услуги в полной мере. Если хотя бы один из параметров полностью не удовлетворен, то метрика принимает нулевое значение. Для того, чтобы избежать ситуации, когда все наборы будут нулевыми, предлагается

сортировка параметров качества обслуживания по важности для каждого класса услуг (чем важнее услуга, тем меньше ее номер). Это позволяет пренебречь малозначимыми показателями QoS. Также комплексный критерий учитывает нелинейную чувствительность трафика определенной услуги к параметрам QoS.

**В четвертом разделе «Моделирование и оценка эффективности предложенного метода прогнозирования. Разработка рекомендаций по его практическому использованию»** представлено описание имитационной модели, сделана экспериментальная оценка предложенного метода прогнозирования. Описана программная реализация, интерфейс разработанного программного обеспечения. Приведены результаты компьютерных экспериментов с использованием пакета аналитического моделирования.

Методы, описанные в разделе, посвященном обоснованию метода прогнозирования оценок, используются для определения оценки качества транспортной сети МОС при подключении пользователя. Моделирование основано на том, что любой подключаемый пользовательский терминал позволяет собирать определенные данные для его качественного обслуживания. Решение о подключении, обычно, основано на лучшем соотношении сигнал/шум. Однако, при нахождении терминала пользователя в зоне действия нескольких базовых станций, подключение «выгоднее» осуществлять на основе оценок эффективности работы транспортной сети МОС. Предложенный метод используется для минимизации количества обновлений показателей качества работы транспортной сети МОС. Оценка эффективности предложенных методов путем исследования следующих имитационных моделей: оценки величины выделяемой пропускной способности; оценки задержек, вносимых планировщиком контроллера базовой станции; оценки качества работы сети на основе многокритериальной теории полезности.

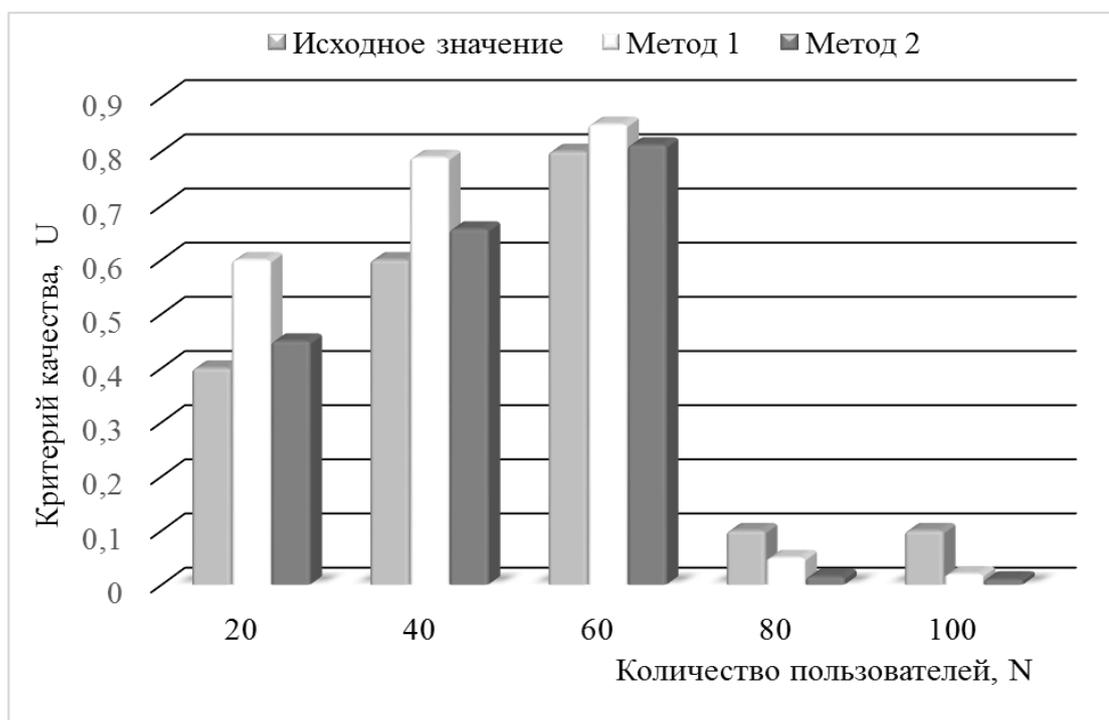


Рисунок 5 – Зависимость критерия качества работы транспортной сети МОС от количества подключаемых пользователей

Проведена оценка эффективности предложенных методов путем исследования следующих имитационных моделей: оценки величины выделяемой пропускной способности; оценки задержек, вносимых планировщиком контроллера базовой станции; оценки качества работы сети на основе многокритериальной теории полезности. Исследования проводились для случая подключения любого пользователя к одной базовой станции (рисунок 5).

На рисунке представлены полученные значения критерия качества работы транспортной сети МОС, в зависимости от типа получаемых оценок: «Исходное значение» – практически измеренные значения; «Метод 1» – значения полученные на основе известных методов прогнозирования; «Метод 2» – значения полученные на основе обоснованного в работе метода прогнозирования.

Показано, что 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.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе решена научная задача повышения эффективности функционирования транспортной сети мобильного оператора связи, за счет научного обоснования и практического применения гибридного метода прогнозирования оценок качества, формирующего 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.

6. Результаты диссертационной работы внедрены в производственный процесс ГУП ДНР «УГЛЕТЕЛЕКОМ», а материалы исследования включены в учебный процесс федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донецкий национальный технический университет».

#### **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.

#### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук:*

1. **Климов, В. В.** Обоснование комплексного показателя качества работы транспортной сети мобильного оператора связи / В. В. Климов, М. Н. Чепцов, В. Н. Лозинская // Вестник ДонНУ. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 4. – С. 175-182.

2. **Климов, В. В.** Подход к прогнозированию пропускной способности канала связи / **В. В. Климов**, М.Н. Чепцов // Вестник ДонНУ. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 119-125.

*Публикации в рецензируемых научных изданиях, учредителями которых являются образовательные организации высшего образования и научные организации, расположенные на территории Донецкой Народной Республики:*

3. **Климов, В. В.** Обоснование метода прогнозирования оценок качества работы транспортной сети мобильного оператора связи. / **В. В. Климов** // Вестник Академии гражданской защиты. – 2021. – Вып. 4 (28). – С. 69-74.

4. **Климов, В. В.** Чепцов, М.Н. Анализ критериев надежности беспроводной транспортной сети оператора мобильной связи/ **В. В. Климов**, М. Н. Чепцов // Вестник Академии гражданской защиты. – 2021. – Вып. 2 (26). – С. 59-66.

5. **Климов, В. В.** Классический подход к прогнозированию оценок магистрального канала сети оператора мобильной связи/ **В. В. Климов**, М.Н. Чепцов// Вестник ДонНУ. Серия Г: Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 56-61.

6. **Климов, В. В.** Метод прогнозирования оценки пропускной способности / **В. В. Климов** // Информатика и кибернетика. – Донецк, 2020. – №4(22). – С. 54-61.

7. **Климов, В. В.** Метод прогнозирования оценки размера буфера контроллера базовой станции / **В. В. Климов**, М. Н. Чепцов // Проблемы искусственного интеллекта. – Донецк, 2020. – №3(18). – С. 49-59.

8. **Климов, В. В.** Анализ оценок эффективности работы транспортной сети мобильного оператора связи / **В. В. Климов**, М. Н. Чепцов// Сборник научных трудов ДОНИЖТ. – Донецк, 2020. – №56. – С. 43-48.

***Научные работы и тезисы докладов в материалах конференций:***

9. **Климов, В. В.** Прогностическая модель дождевого затухания в мобильных транспортных сетях / В. В. Климов // Информационное пространство Донбасса: проблемы и перспективы материалы V Республиканской с международным участием научно-практической конференции. – Донецк: ГО ВПО «ДонНУЭТ», 2022. – С. 124-126.

10. **Климов, В. В.** Метод распределения спектра оптической сети с обеспечением качества обслуживания / В. В. Климов, В. Н. Лозинская, С. И. Светличный // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: сборник научных трудов XXII международной научно-технической конференции аспирантов и студентов в г. Донецке 24-26 мая 2022 г. - Донецк: ДОННТУ, 2022. – С.56-59.

11. **Климов, В. В.** Разработка метода прогнозирования оценок качества работы транспортной сети мобильного оператора связи / В. В. Климов, М. Н. Чепцов // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: сб. науч. тр. / под ред. Ю.Б. Гимпилевича. – Москва-Севастополь: Изд-ва: РНТОРЭС им. А.С. Попова, СевГУ, 2021. – №4. – С. 164. – ISSN 2658-6347

12. **Климов, В. В.** Разработка функций полезности использования сетевых ресурсов оператором связи / В. В. Климов // Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2020): сборник трудов XVIII Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (Таганрог, 3–5 декабря 2020 г). – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2020. – Т.1. – С. 44-49.

13. **Климов, В. В.** Исследование трафика backhaul сети мобильного оператора связи / В. В. Климов // Информационное пространство Донбасса: проблемы и перспективы материалы III Республиканской с международным участием научно-практической конференции. – Донецк: ГО ВПО «ДонНУЭТ», 2020. – С. 42-46.