

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Платоновой Анны Алексеевны на тему «Построение и анализ модели для расчета вероятностно-временных характеристик сети интегрированного доступа и транзита с разделением ресурсов», представленную к защите в ПДС 0200.006 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика

Актуальность темы

Современные и перспективные беспроводные сети, включая 5G и будущие 6G, сталкиваются с беспрецедентными вызовами, обусловленными экспоненциальным ростом числа подключенных устройств, разнообразием сервисов и ужесточением требований к показателям качества обслуживания. Особую значимость приобретают сверхнизкие задержки, высокая надежность и актуальность информации для критически важных приложений, таких как промышленный Интернет вещей, телемедицина и автономный транспорт. В данном контексте технология нарезки сети (Network Slicing) в сетях радиодоступа 5G является фундаментальным механизмом для эффективного использования единой физической инфраструктуры и предоставления специализированных логических сетей (слайсов) с гарантированными показателями производительности. Однако эффективное управление динамическим выделением ресурсов, обеспечение строгой изоляции слайсов и оптимизация производительности в условиях постоянно меняющейся абонентской нагрузки остаются сложными задачами.

Таким образом, учитывая вышеизложенное, разработка моделей и методов для оптимизации распределения ресурсов в IAB-сетях с учетом специфических ограничений, направленных на минимизацию сквозной задержки и возраста информации, является актуальной научной и практической задачей. Диссертационная работа Платоновой А.А. направлена на решение именно этих актуальных проблем, что подтверждает своевременность и значимость выбранной темы.

Характеристика содержания диссертационной работы

Диссертационная работа Платоновой А.А. представляет собой законченное научное исследование, изложенное на 106 страницах, включающее введение, три главы, заключение, список основных обозначений и список литературы из 85 источников. Работа содержит 23 рисунка и 4 таблицы.

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируются цель и задачи исследования, определяются научная новизна и практическая ценность работы, а также положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлены исследования технологии нарезки ресурса в сетях радиодоступа 5G. Разработана методика разделения ресурса между слайсами для систем с приоритизацией и без приоритизации, учитывающая динамическое выделение ресурсов и максиминную справедливость, а также возможность избыточного резервирования ресурсов («овербукинг»).

Вторая глава посвящена анализу показателей качества предоставления услуги категории «Best Effort» на основе математической модели слайса в виде системы массового обслуживания с дисциплиной разделения процессора и эластичным трафиком с ограничением на максимальную скорость передачи. Введено понятие деградации обслуживания абонента и получено аналитическое выражение для вероятности деградации. Проведен численный анализ влияния различных методов вызова процедуры нарезки на показатели эффективности.

Третья глава посвящена построению модели передачи трафика в сети IAB с учетом особенностей многошаговой беспроводной сети, включая полудуплексный режим передачи данных. В комплексную задачу оптимизации сети IAB включен новый показатель качества обслуживания – возраст информации. Разработан алгоритм расчета оптимальных долей времени активности каналов сети IAB, минимизирующих среднюю сквозную задержку и средний пиковый возраст информации, а также вычисления правостороннего квантиля заданного уровня для функций распределения указанных случайных величин на маршруте в виде распределения фазового типа.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Достоверность и новизна результатов диссертации

Достоверность основных положений, выводов и рекомендаций подтверждается строгим использованием математического аппарата, включающего методы теории вероятностей, марковских случайных процессов, математической теории телетрафика, теории оптимизации, корректностью применяемых допущений, а также верификацией аналитических моделей с помощью дискретно-событийного имитационного моделирования в среде OMNeT++.

Научная новизна диссертационной работы не вызывает сомнений и подтверждается следующими положениями, выносимыми на защиту:

1. Разработан метод разделения ресурсов между слайсами сети при динамическом выделении ресурса на основе максиминной справедливости с учетом

приоритизации слайсов, который, в отличие от известных, предусматривает избыточное резервирование ресурсов типа «овербукинг».

2. Предложено понятие деградации обслуживания абонента в случае падения скорости передачи данных при предоставлении услуги абоненту ниже заданного порога, что позволило получить аналитическое выражение для вероятности деградации обслуживания и сравнить показатели эффективности обслуживания абонентов для нескольких методов вызова процедуры нарезки ресурса.

3. Формализована и решена проблема минимизации средней по сети интегрированного доступа и транзита сквозной задержки и среднего пикового возраста информации, при этом в отличие от известных результатов показано, что случайная величина задержки на маршруте сети имеет функцию распределения фазового типа.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Степень обоснованности подтверждается математически корректными выводами, представленными в работе, согласованностью результатов, полученных для разных моделей между собой и с известными в теории массового обслуживания результатами, а также многочисленными экспериментами и численным анализом. Представленные в диссертационной работе результаты достаточно полно апробированы на всероссийских и международных конференциях, что также свидетельствует о достоверности и обоснованности изложенных в диссертации результатов.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, являются хорошо обоснованными.

Диссертация демонстрирует четкую логическую структуру: от обзора актуальных технологий и постановки задач к построению математических моделей и анализу показателей эффективности, а затем к более сложным моделям многошаговых сетей и оптимизации задержки и возраста информации. Каждая глава последовательно развивает предыдущие результаты.

Для всех ключевых положений представлены как аналитические выражения (например, для вероятности деградации, стационарного распределения числа заявок, средней доли занятого ресурса, средней скорости обслуживания, функции распределения сквозной задержки и пикового возраста информации), так и численные результаты моделирования, подтверждающие теоретические выводы. Это обеспечивает высокую степень обоснованности.

Выводы, представленные в заключении и в конце каждой главы, логически следуют из проведенного анализа и моделирования. Рекомендации по выбору

методов нарезки ресурса (например, вызов по деградации как оптимальный баланс между QoS и вычислительной сложностью) являются практически ценными и обоснованными.

Ценность для науки и практики результатов работы

Полученные в диссертационной работе результаты обладают существенной теоретической и практической значимостью.

Работа развивает математический аппарат теории массового обслуживания и теории оптимизации, предлагая новые подходы к анализу управления ресурсами в современных и перспективных беспроводных сетях. Разработанные модели и выведенные аналитические выражения для таких показателей эффективности, как коэффициент использования ресурса, вероятность деградации обслуживания, сквозная задержка и возраст информации, расширяют теоретические основы для глубокого понимания поведения сложных сетевых систем с нарезкой ресурса и многошаговой передачей. Особый вклад вносится в исследование возраста информации за счет его анализа в контексте IAB-сетей с полудуплексными ограничениями, что является важным направлением в теории массового обслуживания и стохастической геометрии.

Работа имеет значительную практическую ценность, выражающуюся в разработке конкретных моделей и алгоритмов, применимых для проектирования, планирования и оптимизации сетей 5G/6G. Предложенные стратегии нарезки ресурса и методы оптимизации долей времени активности каналов в IAB-сетях позволяют операторам связи эффективно управлять сетевыми ресурсами, гарантировать требуемое качество обслуживания для разнообразных услуг, минимизировать сквозные задержки и обеспечивать требования к возрасту информации для критически важных приложений. Это способствует не только повышению производительности сети, но и снижению вычислительной сложности управления, поскольку алгоритмы могут быть интегрированы в системы управления радиоресурсами и менеджеры нарезки ресурса в реальных сетях.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати

Основные результаты диссертации изложены в 11 работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, что полностью соответствует требованиям ВАК. В частности, 5 работ входят в базу данных Scopus (Q2, Q3), 1 издание входит в список журналов, рекомендованный Высшей аттестационной комиссией при Минобрнауки России, и 3 свидетельства о государственной регистрации программ для электронно-вычислительной машины (ЭВМ). Результаты диссертации также были апробированы на международных и всероссийских научных конференциях.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Автореферат логически выстроен, хорошо структурирован, правильно и в достаточной мере отражает содержание диссертационной работы. Как часть выполненной научной работы автореферат отражает компетентность автора в области проводимых исследований и хорошее владение используемыми математическими методами.

Замечания по работе

1. Актуальность работы не вызывает сомнения, однако в аналитическом обзоре следовало бы сослаться на стандарты международных стандартизирующих организаций по сети с нарезкой радиоресурсов сети и по сети интегрированного доступа и транзита.
2. Для модели сети с нарезкой ресурсов из первой главы и модели отдельного слайса сети с нарезкой ресурсов (вторая глава) хорошо бы провести соответствие между вероятностью потерь в первой модели и вероятностью деградации во второй.
3. В диссертации присутствуют стилистические погрешности, возникшие при переводе с английского технических терминов, например, на стр. 25 вместо «договорные» следует использовать «контрактные», на стр. 30 вместо «оптимизация стремится к максимизации» - «оптимизация заключается в максимизации», там же вместо «аллокации» - «выделении ресурсов».
4. На стр. 41-42 при построении модели автор предлагает общую структуру СМО с произвольными распределениями вероятностей длин интервалов между поступлениями заявок ($A_s(x)$) и временем обслуживания ($B_s(x)$), но в работе решает задачу для экспоненциальных распределений с одинаковыми параметрами. Нет обоснования такого выбора параметров.
5. На стр. 82 вводится случайная величина Y_p – время между моментами генерации пакетов по p -пути и утверждается, что «можно считать, что Y_p распределена экспоненциально с параметром Λ_p ». Как определяется параметр Λ_p через параметры системы?
6. Также в диссертации имеются опечатки. Например, на стр. 81 при доказательстве теоремы автор ссылается на формулы (3.8) и (3.9), но формул с таким номером нет.

Отмеченные выше замечания не снижают научную ценность результатов и общее положительное впечатление о диссертационной работе.

Заключение

Диссертационное исследование Платоновой Анны Алексеевны является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной задачи, имеющей важное значение для разработки моделей управления ресурсами в беспроводных сетях новых поколений и анализа показателей их эффективности.

Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук согласно пункта 2.2 раздела II Положения о присуждении учёных степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», утверждённого Учёным советом РУДН, протокол УС-1, 22.01.2024, а её автор, Платонова Анна Алексеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика.

Официальный оппонент, Моисеева Светлана Петровна доктор физико-математических наук (05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), профессор, заведующий кафедрой теории вероятностей и математической статистики института прикладной математики и компьютерных наук Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Моисеева Светлана Петровна

«_03_» июня 2026 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»,

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36

Тел.: +7 (3822) 529-585

E-mail: rector@tsu.ru

Страница в интернете: <http://www.tsu.ru>

Подпись Моисеевой Светланы Петровны удостоверяю

Ученый секретарь Ученого совета ТГУ



Т. Ю. Осипова