

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 55.2.004.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ ИМ. ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
МИНИСТЕРСТВА ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ
КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 15 декабря 2023 г. № 18

О присуждении Мутханне Аммару Салеху Али, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Разработка и исследование комплекса моделей и методов интеграции граничных вычислений в сетях связи пятого и шестого поколений» по специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций принята к защите 13 сентября 2023 года, протокол № 11 диссертационным советом 55.2.004.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, 191186, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, д. 61, приказ № 258/нк от 27 марта 2019 года.

Соискатель Мутханна Аммар Салех Али, 1984 года рождения, работает доцентом кафедры сети связи и передачи данных в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации.

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Исследование трафика и протоколов маршрутизации в беспроводных сетях» защитил в 2016 году в диссертационном совете, созданном на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего

образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики». С 2022 по настоящее время является докторантом Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича».

Диссертация выполнена на кафедре сети связи и передачи данных Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации.

Научный консультант – доктор технических наук, Кучерявый Андрей Евгеньевич, основное место работы: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», кафедра сети связи и передачи данных, заведующий кафедрой.

Оппоненты: 1. Колбанёв Михаил Олегович, доктор технических наук, профессор, основное место работы: Санкт-Петербургский государственный экономический университет, кафедра информационных систем и технологий, профессор кафедры; 2. Никульский Игорь Евгеньевич, доктор технических наук, с.н.с., основное место работы: ПАО «ЦНПО «Ленинец», отдел 133, Главный специалист, заместитель Главного конструктора, 3. Татарникова Татьяна Михайловна, доктор технических наук, профессор, основное место работы: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, институт информационных технологий и программирования, директор института дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, в своем положительном заключении, подписанном Вишневым Владимиром Мироновичем, доктором технических наук, профессором, заведующим лабораторией № 69 «Управление сетевыми системами», утвержденном Новиковым Дмитрием Александровичем, академиком

Российской академии наук, доктором технических наук, профессором, директором, указала, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена научная проблема разработки и исследования комплекса моделей и методов интеграции граничных и/или туманных вычислений в сетях связи пятого и шестого поколений для глобального фрагмента Воздух–Земля концепции SAGSIN, имеющая важное значение для отрасли цифрового развития и связи, а также специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Полученные соискателем результаты отличаются научной новизной и практической значимостью. Результаты апробированы на значимых научных конференциях. Основные научные результаты диссертации достаточно полно опубликованы в ведущих российских и зарубежных изданиях. Название работы полностью отражает её содержание, а само содержание диссертации соответствует пунктам 2, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12 и 18 паспорта специальности 2.2.15. Автореферат адекватно отражает содержание диссертационной работы и её основные результаты. Диссертационная работа соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении учёных степеней» (утв. постановлением Правительства России от 24.09.2013 № 842 в ред. 18.03.2023), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора технических наук, а её автор, Мутханна Аммар Салех Али, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Соискатель имеет 137 опубликованных работ по теме диссертации, из них в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, – 24, а также: 87 работ в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования; 2 результата интеллектуальной деятельности; 18 статей в других научных журналах, сборниках научных статей, трудов и материалах конференций; 6 отчетов о НИР. 7 работ опубликованы соискателем без соавторства. Общий объём авторского вклада в работы (без результатов интеллектуальной собственности) составляет 82,1 печ.л. из общего количества 205,8 печ.л. Диссертация не содержит

недостовверных сведений об опубликованных соискателем ученой степени работах.

Наиболее значительные научные работы по теме диссертации.

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Мутханна А.С. Метод размещения SDN-контроллеров на мобильных узлах сетей VANET для высокоплотных и сверхплотных сетей 6G / А.С. Мутханна // Электросвязь. 2023. № 8. С. 19-27.

2. Мутханна А.С. Модель интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух–земля» и метод выгрузки трафика для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности / А.С. Мутханна // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 3. С. 42-59.

3. Мутханна А.С.А. Интегральное решение проблемы размещения контроллеров и балансировки нагрузки / А.С.А. Мутханна // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 2. С. 81-93.

4. Мутханна А.С.А. Модельная сеть для исследований и обучения в области услуг телеприсутствия / А.Е. Кучерявый, М.А. Маколкина, А.И. Парамонов, А.И. Выборнова, А.С. Мутханна, А.Ю. Матюхин, Р.А. Дунайцев, С.С. Владимиров, О.И. Ворожейкина, М.В. Захаров, В.Д. Фам, А.В. Марочкина, Л.С. Горбачева, Б.О. Паньков, Б.Н. Анваржонов // Электросвязь. 2022. № 1. С. 14-20.

5. Мутханна А.С.А. Перспективные исследования сетей и услуг 2030 в лаборатории 6G MEGANETLAB СПбГУТ / А.Н. Волков, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый, А.С. Бородин, А.И. Парамонов, С.С. Владимиров, Г.А. Фокин, Р.А. Дунайцев, М.В. Захаров, Л.С. Горбачева, Б.О. Паньков, Б.Н. Анваржонов // Электросвязь. 2023. № 6. С. 5-14.

6. Мутханна А.С.А. Алгоритмы кластеризации для БПЛА в сетях пятого и последующих поколений / А.А. Алзагир, В.Н. Коваленко, А.С. Бородин, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2022. № 10. С. 9-15.

7. Мутханна А.С.А. Искусственный интеллект в сетях связи пятого и последующих поколений / А.С. Бородин, А.Н. Волков, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2021. № 1. С. 17-22.

8. Мутханна А.С.А. Разработка интеллектуальной системы для управления граничными вычислениями / А.А. Хакимов, А.С.А. Мутханна, А.И. Выборнова // Электросвязь. 2021. № 4. С. 37-42.

9. Мутханна А.С.А. Исследование мультисервисных приложений V2X-сети / А.Г. Владыко, А.А. Хакимов, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2021. № 7. С. 17-22.

10. Мутханна А.С.А. Метод глубокого обучения с подкреплением для систем интернета вещей на базе технологии lora с ограниченными ресурсами и поддержкой QOS / М.С. Мутанна, А.С.А. Мутханна, А.С. Бородин // Электросвязь. 2021. № 8. С. 23-26.

11. Мутханна А.С.А. Система обнаружения и распознавания движущихся биологических объектов для беспилотных автомобилей на основе интеллектуальных граничных вычислений / М.А. Аль-Свейти, А.С.А. Мутханна, А.С. Бородин, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2021. № 9. С. 35-41.

12. Мутханна А.С.А. Применение робастных m-оценок для машинного обучения в сетях VANET / А.Р. Абделлах, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2020. № 5. С. 41-46.

13. Мутханна А.С.А. Интеллектуальная распределенная архитектура сети связи для поддержки беспилотных автомобилей / А.С.А. Мутханна // Электросвязь. 2020. № 7. С. 29-34.

14. Мутханна А.С.А. Метод выгрузки трафика В V2X/5G сетях на основе системы граничных вычислений / А.Г. Владыко, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2020. № 8. С. 24-30.

15. Мутханна А.С. Исследование моделей балансировки нагрузки в программно-конфигурируемых сетях / С. Мухизи, А.С. Мутханна, Р.В. Киричек, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2019. № 1. С. 23-29.

16. Мутханна А.С. Приложения дополненной реальности в «умных городах» / М.А. Маколкина, А.С. Бородин, А.С. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2019. № 12. С. 44-50.

17. Мутханна А.С. Интеллектуальное ядро для сетей связи 5G и тактильного интернета на базе программно-конфигурируемых сетей / А.А. Атея, А.С. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2019. № 3. С. 34-40.

18. Мутханна А.С. Модели сегментации и кластеризации ресурсов в программно-конфигурируемых сетях / С. Мухизи, А.А. Атея, А.С. Мутханна, Р.В. Киричѐк // Электросвязь. 2019. № 4. С. 26-31.

19. Мутханна А.С.А. Метод выгрузки трафика приложений дополненной реальности в многоуровневой системе граничных вычислений / М.А. Маколкина, А.А. Атея, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2019. № 6. С. 36-42.

20. Muthanna A. END-TO-END system structure for latency sensitive applications of 5G / A. Ateya, M. Al-Bahri, A. Muthanna, A. Koucheryavy // Электросвязь. 2018. № 6. С. 56-61.

21. Muthanna A. The study of semantic gateway performance / V. Kulik, A. Muthanna, V. Pham, A. Nakimov, R.V. Kirichek, R.Ya. Pirmagomedov // Электросвязь. 2017. № 6. С. 69-73.

22. Мутханна А.С. Исследование перегрузок во всепроникающих сенсорных сетях / А.С. Мутханна, А.И. Выборнова, А.И. Парамонов // Электросвязь. 2016. № 1. С. 53-59.

23. Мутханна А.С. Сравнение протоколов маршрутизации для всепроникающих сенсорных сетей / А.С. Мутханна // Электросвязь. 2014. № 9. С. 5-10.

24. Мутханна А.С. Модели трафика для приложений передачи изображений во всепроникающих сенсорных сетях / А.С. Мутханна, А.В. Прокопьев // Электросвязь. 2013. № 1. С. 28-31.

Публикации в изданиях, индексируемых в МБЦ:

25. Muthanna A. Chaotic salp swarm algorithm for SDN multi-controller networks / A. Abdelhamied A., A. Muthanna, A. Vybornova, A. D. Algarni, A. Abuarqoub, Y. Koucheryavy, and A. Koucheryavy // Engineering Science and Technology, an International Journal 22, no. 4 (2019): 1001-1012.

26. Muthanna A. Energy-and latency-aware hybrid offloading algorithm for UAVs / A. Abdelhamied A.A., A. Muthanna, R. Kirichek, M. Hammoudeh, and A. Koucheryavy // *IEEE Access* 7 (2019): 37587-37600.

27. Muthanna A. Towards optimal positioning and energy-efficient UAV path scheduling in IoT applications / M.S.A. Muthanna, A. Muthanna, T.N. Nguyen, A. Alshahrani, and A.A. Abd El-Latif // *Computer Communications* 191 (2022): 145-160.

28. Muthanna A. Optimizing Task Offloading Energy in Multi-User Multi-UAV-Enabled Mobile Edge-Cloud Computing Systems / S. Alhelaly, A. Muthanna, and I.A. Elgendy // *Applied Sciences* 12, no. 13 (2022): 6566.

29. Muthanna A. Intelligent and Robust UAV-Aided Multiuser RIS Communication Technique With Jittering UAV and Imperfect Hardware Constraints / A. Abuzar BM, X. Wan, M. AM Elhassan, M.S.A. Muthanna, A. Muthanna, N. Kumar, and M. Guizani // *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (2023).

30. Muthanna A. A mobile edge computing/software-defined networking-enabled architecture for vehicular networks / A. Muthanna, R. Shamilova, AA. Ateya, A. Paramonov, and M.Hammoudeh // *Internet Technology Letters* 3, no. 6 (2020): e109.

31. Muthanna A. Development of intelligent core network for tactile internet and future smart systems / A.A. Abdelhamied, A. Muthanna, I. Gudkova, A. Abuarqoub, A. Vybornova, and A. Koucheryavy // *Journal of Sensor and Actuator Networks* 7, no. 1 (2018).

32. Muthanna A. Intelligent transmission control for efficient operations in SDN / R. Alkanhel, A. Ali, F. Jamil, M. Nawaz, F. Mehmood, and A. Muthanna // *CMC-Comput. Mater. Continua* 71, no. 2 (2022): 2807-2825.

33. Muthanna A. Lightweight Deep Learning-Based Model for Traffic Prediction in Fog-Enabled Dense Deployed IoT Networks / A.A. Abdelhamied, N.F. Soliman, R. Alkanhel, A.A. Alhussan, A. Muthanna, and A. Koucheryavy // *Journal of Electrical Engineering & Technology* 18, no. 3 (2023): 2275-2285.

34. Muthanna A. Advanced deep learning-based computational offloading for multilevel vehicular edge-cloud computing networks / M. Khayyat, I.A. Elgendy,

A. Muthanna, A.S. Alshahrani, S. Alharbi, and A. Koucheryavy // IEEE Access 8 (2020): 137052-137062.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: официального оппонента Колбанева М.О., официального оппонента Никульского И.Е., официального оппонента Татарниковой Т.М.; ведущей организации ИПУ РАН; Васильева А.Б., к.т.н., заместителя генерального директора ПАО "Гипросвязь"; Гольдштейна А.Б., д.т.н., генерального директора ООО «НТЦ АРГУС»; Гребешкова А.Ю., д.т.н., доц., профессора кафедры сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики; Зацаринного А.А., д.т.н., проф., главного научного сотрудника ФИЦ «Информатика и управление» РАН; Картака В. М., д.ф.-м.н., доц., заведующего кафедрой вычислительной техники и защиты информации Уфимского университета науки и технологий; Самойлова А.Г., д.т.н., проф., профессора кафедры радиотехники и радиосистем Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых; Сарьяна В. К., д.т.н., проф., научного консультанта Ордена Трудового Красного Знамени Российского научно-исследовательского института радио имени М. И. Кривошеева; Севастьянов Л.А., д.ф.-м.н., проф., профессор кафедры математического моделирования и искусственного интеллекта Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы; Степанова М.С., к.т.н., доц., доцента кафедры сетей связи и систем коммутации Московского технического университета связи и информатики; Тихвинского В.О., д.э.н., к.т.н., проф., профессора кафедры экономики и организация производства Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Все отзывы положительные, но имеются критические замечания: хороший фундаментальный анализ развития сетей связи в главе 1 несколько отягощен перспективными значениями задержки и скорости мобильных устройств в таблице 1.3.2 на стр. 39-40. Если уже сейчас при круговой задержке значения в 1 мс ограничения по предоставлению услуг Тактильного Интернета составляют 50 км, то неясно, о каких сетевых услугах может идти речь при задержках в 0,1 мс и, соответственно, расстояниях в 5 км. Это же относится и к скорости

транспортного средства в 1000 км/час. При анализе функционирования кластерной мультиконтроллерной сети SDN и ее архитектуры на рис. 2.3.1 отмечается, что назначение бета-контроллера осуществляется альфа-контроллером после того, как нагрузка между кластерами станет несбалансированной. Хотелось бы видеть при этом критерий несбалансированности, а также то, почему не используются известные ранее наработки по кластеризации беспроводных сенсорных сетей, при исследовательских работах по которым были разработаны методы, основанные на разбиении жизненного цикла сети на постоянные по времени раунды. Последнее, возможно, помогло бы уменьшить время нахождения системы в режиме несбалансированности нагрузки. На стр. 307-308 приведена классификация программноконфигурируемых сетей SDN, в которой одним из вариантов является SDN-сеть на основе туманных вычислений – SDN централизованной топологии с распределенными граничными контроллерами SDN, интегрированными в туманные узлы. Требуется пояснения к такой реализации, поскольку непонятно, есть ли SDN в такой структуре и, если есть, то где они расположены на сети. На стр. 131 рукописи диссертации автор работы приводит многосерверную модель очередей для оценки временного отклика контроллера на основе СМО класса M/M/s, но не дает обоснования возможности применения модели простейшего потока и пуассоновского распределения интервалов обслуживания для моделирования рассматриваемого класса процессов. Целевой функционал оптимизационной задачи (12) на стр. 134 работы не учитывает затрат на эксплуатацию исследуемой сети. На стр. 314 работы приводится исследование доли заблокированных задач при разном количестве доступных задач, при этом автор работы оперирует одним параметром процесса блокировки – вероятностью блокировки, вместе с тем из содержания рукописи диссертации неясно какие распределения интервалов блокировки использовал автор при проведении данного исследования. При описании математической модели кластерной мультиконтроллерной сети SDN, в п. 2.4 на стр. 132 автор описывает использование модели M/M/s. однако, автор не приводит достаточно убедительных пояснений о возможности использования такой модели. Следовало

бы пояснить возможность использования модели пуассоновского потока и модели экспоненциального распределения времени обслуживания или охарактеризовать ошибку, вносимую ее применением. В модели выгрузки трафика, описанной на стр. 200-216 автор моделирует достижимую скорость передачи данных выражением Шеннона, не давая пояснений относительно того, какая технология связи применяется на этом участке. Использование данной модели может давать завышенные оценки в случае одного пространственного потока или заниженные в пространственно-временном кодировании (ММО). При формировании кластера в сети с БПЛА (п. 3.1.4) автор приводит алгоритм, который опирается на текущие данные о координатах БПЛА и узлов сети, однако, при движении БПЛА или иных узлов сети, следует опираться на прогнозируемые значения их координат и учитывать характеристики движения в противном случае, время существования сформированного кластера может оказаться слишком малым, а его перестроение приведет к снижению эффективности. Следовало бы более подробно объяснить, чем модифицированный алгоритм роя салп CSSA отличается от известного ранее. Из автореферата на стр. 16 не понятна роль коэффициента $C1$, а именно что подразумевается под балансом «разведки» и «эксплуатации», а также итерация чего именно происходит в формуле (2)? В автореферате на рис. 2-3 представлены результаты моделирования разработанного оптимизированного метода кластеризации. Во втором сценарии оценивается влияние верхнего индекса использования SDN-контроллера Uub , а в третьем сценарий – верхней границы индекса использования кластера $UC-ub$. Из автореферата неясен диапазон значений данных индексов, исследовались ли нижние индексы использования и границы индекса, и их влияние? На стр. 34-35 говорится о том, что разработанный метод прогнозирования трафика основан на использовании облегченной сверточной нейронной сети, где для тренировки нейронной сети использовались пакеты наборов данных. Однако автор не указывает, как были получены наборы данных – в результате перехвата сетевого трафика в рамках тестового сегмента сети или были специальным образом искусственно сгенерированы. Как известно, в настоящее время в России функционируют мобильные сети нескольких поколений (2G, 3G, 3,5G, 4G). Однако в диссертации не рассмотрены проблемные

вопросы переходного периода к сетям 5 и 6 поколений с учетом существующих сетей. Известно, что развитием сетей связи поколения 5G в мире активно занимаются целый ряд компаний (Huawei (Китай), Samsung (Южная Корея), Qualcomm (США), Ericson (Швеция), Verizon (США), AT&T (США), Nokia (Финляндия) и другие). При этом крупнейшие игроки мирового рынка мобильной связи, прежде всего, Qualcomm и Huawei, предлагают свои концепции будущих сетей. Однако в диссертации анализ мирового опыта в этой области не приведен. В главе 2 упоминается, находится «оптимальное количество SDN-контроллеров и кластеров...», однако в автореферате нигде не сформулированная задача оптимизации. Так как представленный алгоритм CSSA является метаэвристическим, не понятно, как происходит доказательство оптимальности данных решений. В автореферате, на стр. 14 после фразы «Методология этой архитектуры может быть представлена следующим образом» нет продолжения и методология архитектуры интеграции уровней в автореферате не раскрыта. На стр. 19 автореферата предлагается при сравнении разработанного автором алгоритма с известными использовать две различные метрики: долю отказов в обслуживании со стороны контроллера и процент общего времени использования системы контроллеров в целом. Почему выбраны именно эти метрики эффективности алгоритма в автореферате не объяснено. На стр. 38 в п. 5. «Развернута сеть беспилотных летательных аппаратов для покрытия мертвых зон и зон с высокой плотностью сети». Не ясно какая сеть БПЛА развернута – реальная или модельная. Не вполне понятен смысл формулы (1), в частности, в условиях фигурирует символ S_3 , хотя в выражении для вектора позиции его нет. Не понятно, как интерпретировать рис. 5, который назван «Доля отказов в обслуживании ...», а единицы измерения по оси абсцисс названы «Время отказа, %». В качестве замечаний следует отметить, что в автореферате, при описании метода размещения контроллеров и решении задачи оптимизации, следовало привести целевую функцию, указать критерий оптимизации и четче сформулировать, в чем заключается модификация алгоритма «роя сальп». Из текста автореферата не совсем понятно, как оценивалось энергопотребление при использовании мобильных серверов граничных вычислений с применением

трехуровневой процедуры выгрузки трафика. Из рис. 2 и 3 на стр. 17 не до конца остался ясным физический смысл 16 топологий, показанных на оси x представленных графиков. Из рис. 4 на стр. 18 не до конца остался ясным физический смысл верхней границы индекса использования SDN-контроллера и кластера. Из рис. 5, 6 неясно, в чем измеряется пороговое время отклика. При описании модели и метода интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности в автореферате не поясняется, как выбиралось число конечных устройств при сравнении среднего энергопотребления для различных типов приложений.

Выбор оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что оппоненты являются известными учеными в области сетей и систем связи, а ведущая организация – несомненным лидером по системам массового обслуживания для сетей связи. Д.т.н., профессор М.О. Колбанёв – один из ведущих ученых в области развития сетей и систем телекоммуникаций, имеющий большой опыт и существенные публикации как в целом по проблемам построения сетей и предоставляемых ими услуг, так и в области новых технологий телекоммуникаций. И.Е. Никульский, д.т.н., с.н.с. активно занимается исследованиями по тематике организации сетей связи, а также вопросами обеспечения надежности в системах передачи данных, чему посвящены его публикации в ведущих научных журналах, является авторитетным ученым, в связи с чем достаточно часто приглашается оппонентом по новым направлениям исследований в области специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций. Д.т.н., профессор Т.М. Татарникова одна из немногих докторов технических наук, которая имеет работы в области искусственного интеллекта для сетей связи, хорошо известна также своими работами в области современных сетей и систем связи, является авторитетным ученым, в связи с чем достаточно часто приглашается оппонентом по новым направлениям исследований в области специальности 2.2.15. Ведущая организация – Институт проблем управления РАН имеет существенные достижения в области сетей и систем связи пятого и последующих поколений. Одна из самых авторитетных научных организаций в стране, достижения которой хорошо известны в научном

мире. Отзыв сформирован в лаборатории № 69 "Управление сетевыми системами" и подписан заведующим лаборатории д.т.н., профессором В.М. Вишневым и утвержден директором ИПУ РАН академиком РАН, д.т.н., профессором Д.А. Новиковым.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований: разработаны модели и методы интеграции граничных и туманных вычислений в сетях связи пятого и шестого поколений; **предложена** трехуровневая процедура выгрузки трафика, причем на конечных устройствах используется программный профилировщик, определяющий сложность вычисляемой задачи, а по результатам его работы механизм принятия решения определяет необходимость выгрузки трафика; **доказано**, что модель и метод интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности обеспечивают уменьшение задержки до более, чем в 2 раза по сравнению с сетью без использования технологий граничных вычислений и на 30-40 % по сравнению с сетью с использованием только наземных граничных вычислений. Кроме того, использование оптимизации на основе метаэвристического хаотического роя салеп дает дополнительный выигрыш около 10 % по сравнению с использованием неоптимизированного алгоритма; **введено** размещение контроллеров на мобильных узлах сетей VANET, например, автобусах, для обеспечения связи в плотных и сверхплотных сетях 6G и взаимодействия с туманной средой устройств сети.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что: доказан метод построения мультиконтроллерной сети, основанный на интегральном решении задач по размещению контроллеров в мультиконтроллерных сетях, базирующийся на метаэвристическом алгоритме вследствие сложности решаемых задач, и алгоритме балансировки нагрузки, позволяет обеспечить наилучшее использование ресурсов контроллеров в таких сетях; **применительно к проблематике диссертации результативно использован** комплекс существующих базовых методов исследования, в т.ч. методы теории телетрафика и теории массового обслуживания, теории вероятностей, математической

статистики, метаэвристические алгоритмы; **изложены** результаты существующих исследований в области сетей связи пятого и шестого поколений, роль и место граничных и/или туманных вычислений, а также сетей беспилотных летательных аппаратов, программноконфигурируемых сетей SDN, сетей взаимодействия устройство-устройство D2D, сетей автомобильного транспорта VANET, беспилотных автомобилей, Интернета Вещей в развитии сетей и систем связи; **раскрыты** особенности построения сети с использованием технологий граничных вычислений MEC, SDN и D2D для поддержки приложений беспилотных автомобилей; **изучены** методы прогнозирования трафика на основе нейронной сети CNN – LTP-CNN с реализацией алгоритма прогнозирования на туманных узлах; **проведена модернизация** алгоритма хаотического роя сальп для использования в иерархических кластерных сетях clus-CSSA.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что: разработаны и внедрены методы интеграции граничных вычислений в сетях связи пятого и шестого поколений в работах Сектора стандартизации телекоммуникаций Международного союза Электросвязи (МСЭ-T) и при выполнении Соглашения о предоставлении из федерального бюджета гранта в форме субсидий, выделяемого для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных организациях высшего образования, научных учреждениях и государственных научных центрах Российской Федерации от «06» июля 2022 г. № 075-15-2022- 1137 по приоритетному направлению научно-технологического развития Российской Федерации 20а – Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта; **определены** для модифицированного алгоритма хаотического роя сальп в иерархических кластерных сетях clus-CSSA доля отказов в обслуживании со стороны контроллера и общее использование системы во всем диапазоне изменения задержки от 1 до 10 мс для сетей связи с ультра малыми задержками; **создана**

методика планирования мульти контроллерных программно-конфигурируемых сетей SDN; **представлены** проекты рекомендаций МСЭ-Т по граничным и туманным вычислениям.

Оценка достоверности результатов исследования выявила: для **экспериментальных работ** результаты получены на модельной сети, построенной на сертифицированном оборудовании; **теория** построена на известных, проверяемых данных, фактах, в т.ч. на результатах фундаментальных работ в области теории телетрафика отечественных и зарубежных ученых; **идея базируется** на обобщении передового опыта и использовании неизвестных ранее взаимосвязей; **использованы** сравнение авторских данных и данных, полученных ранее по рассматриваемой тематике; **установлено** качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике, в тех случаях, когда такое сравнение является обоснованным; **использованы** современные методики сбора и обработки исходной информации.

Личный вклад соискателя состоит в том, что основные результаты диссертации получены автором самостоятельно.

В ходе защиты диссертации было высказано критическое замечание о том, что не на всех слайдах есть строго формализованные представления исследуемых моделей. Почему так?

Соискатель Мутханна А.С.А в ходе заседания **ответил** на задаваемые ему вопросы и привел собственную аргументацию о том, что это связано с ограничением по времени доклада. В самой диссертации каждой модели соответствует её математическое представление.

Диссертационный совет установил, что диссертация «Разработка и исследование комплекса моделей и методов интеграции граничных вычислений в сетях связи пятого и шестого поколений» является законченной научно-квалификационной работой и соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а также пунктам 2, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12 и 18 паспорта научной специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

На заседании 15 декабря 2023 года диссертационный совет принял решение присудить Мутханне А.С.А. ученую степень доктора технических наук за решение научной проблемы разработки и исследования комплекса моделей и методов интеграции граничных и туманных вычислений в сетях связи пятого и шестого поколений для глобального фрагмента Воздух-Земля концепции SAGSIN, имеющей важное значение для отрасли связи и цифрового развития, а также специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 6 докторов наук по научной специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 15, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Гоголь Александр Александрович

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Владыко Андрей Геннадьевич

18 декабря 2023 года