

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 КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 15 июня 2022 г. № 4

О присуждении Мохамеду Али Рефае Абделлаху, гражданину Арабской Республики Египет, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Прогнозирование характеристик трафика для сетей 5G на основе технологий искусственного интеллекта» по специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций принята к защите 13 апреля 2022 года, протокол № 2 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 Мохамед Али Рефае Абделлах, 19 января 1986 года рождения, в 2016 году окончил Университет Аль-Азхар в Арабской Республике Египет. С 01.09.2018 по настоящее время является аспирантом Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича".

Диссертация выполнена на кафедре сетей 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 руководитель – 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 сетей связи и передачи данных, заведующий кафедрой.

Оппоненты: 1. Татарникова Татьяна Михайловна, доктор технических наук, профессор, основное место работы: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), кафедра информационных управляющих систем, профессор кафедры; 2. Степанов Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, основное место работы: Московский технический университет связи и информатики, кафедра сетей связи и систем коммутации, доцент кафедры, дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет дружбы народов", г. Москва, в своем положительном заключении, подписанном Кочетковой Ириной Андреевной, канд. физ.-мат. наук, доц., доцентом кафедры прикладной информатики и теории вероятностей и Севастьяновым Леонидом Антоновичем, д-ром физ.-мат. наук, проф., профессором кафедры прикладной информатики и теории вероятностей, утвержденном Ромащенко Викторией Александровной, и.о. первого проректора – проректора по научной работе, указала, что диссертация "Прогнозирование характеристик трафика для сетей 5G на основе технологий искусственного интеллекта" является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи разработки методов прогнозирования характеристик трафика для сетей 5G на основе технологий искусственного интеллекта, имеющей значение для отрасли цифрового развития и связи, а также специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства и телекоммуникации. Полученные автором результаты отличаются научной новизной и практической значимостью, апробированы на значимых

российских и зарубежных конференциях. Основные научные результаты достаточно полно опубликованы в ведущих российских и зарубежных изданиях. Название работы полностью отражает ее содержание, содержание диссертации соответствует пунктам 3, 11, 12, 14 паспорта специальности "Системы, сети и устройства телекоммуникаций". Автореферат адекватно отражает содержание диссертационной работы и ее основные результаты. На основании изложенного считаем, что диссертация соответствует критериям, которые установлены пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней (утв. Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 N°842, в редакции от 11.09.2021), предъявляемым в отношении диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор Мохамед Али Рефасе Абделлах заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Соискатель имеет 23 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации 18, из них в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, – 3, в том числе 3 по искомой специальности, а также: 12 работ в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования; 3 статьи в других научных журналах, сборниках научных статей, трудов и материалах конференций. Общий объём авторского вклада в работы составляет 18,23 печ.л. из общего количества 25,25 печ.л. Диссертация не содержит недостоверных сведений об опубликованных соискателем ученой степени работах.

Наиболее значительные научные работы по теме диссертации.

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

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

2. Абделлах А.Р., Прогнозирование задержки в сетях интернета вещей и тактильного интернета с использованием машинного обучения / А.Р. Абделлах, О.А. Махмуд, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2021. № 1. С. 23-27.

3. Абделлах А.Р. Глубокое обучение с долговременной краткосрочной памятью для прогнозирования трафика интернета вещей / А.С. Бородин, А.Р. Абделлах, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2021. № 2. С. 26-30.

Публикации в изданиях, индексируемых в МБЦ:

4. Abdellah A.R. Robust Estimation of VANET Performance-Based Robust Neural Networks Learning / Abdellah A.R., Muthanna A., Koucheryavy A. // In: Galinina O., Andreev S., Balandin S., Koucheryavy Y. (eds) Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2019, ruSMART 2019. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham. vol 11660, pp. 402–414, 2019.

5. Abdellah A.R. Energy Estimation for VANET Performance Based Robust Neural Networks Learning / Abdellah A.R., Muthanna A., Koucheryavy A. // In: Vishnevskiy V., Samouylov K., Kozyrev D. (eds) Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2019. Communications in Computer and Information Science, Springer, Cham. Vol. 1141, pp. 127–138, 2019.

6. Ali R. Abdellah, Deep Learning with Long Short-Term Memory for IoT Traffic Prediction / Ali R. Abdellah, Andrey Koucheryavy // Galinina O., Andreev S., Balandin S., Koucheryavy Y. (eds) Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems (NEW2AN /SMART), Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham., Vol. 12525, pp. 267–280, 2020.

7. Ali R. Abdellah, VANET Traffic Prediction Using LSTM with Deep Neural Network Learning / Ali R. Abdellah, Andrey Koucheryavy // Galinina O., Andreev S., Balandin S., Koucheryavy Y. (eds) Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. (NEW2AN/ruSMART). Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham. Vol. 12525, pp. 281–294, 2020.

8. Abdellah A.R. Deep Learning for IoT Traffic Prediction Based on Edge Computing / Abdellah A.R., Artem V., Muthanna A., Gallyamov D., Koucheryavy A. // In: Vishnevskiy V.M., Samouylov K.E., Kozyrev D.V. (eds) Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications. DCCN 2020. Communications in Computer and Information Science, Springer, Cham. Vol. 1337. pp. 18-29, 2020.

9. Abdellah A.R. IoT Traffic Prediction with Neural Networks Learning Based on SDN Infrastructure / Volkov A., Abdellah A.R., Muthanna A., Makolkina M., Paramonov A., Koucheryavy A. // In: Vishnevskiy V.M., Samouylov K.E., Kozyrev D.V. (eds) Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2020. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham. Vol. 12563. pp. 64-76, 2020.

10. Ali R. Abdellah, IoT traffic prediction using multi-step ahead prediction with neural network / Ali R. Abdellah, O.A.K. Mahmood, A. Paramonov, A. Koucheryavy // 2019 11th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), Dublin, Ireland, 2019, pp. 1-4.

11. Ali R. Abdellah, Delay prediction in IoT using Machine Learning Approach / Ali R. Abdellah, O.A. Mahmood, A. Koucheryavy // 2020 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), Brno, Czech Republic, 2020, pp. 275-279.

12. Abdellah, A.R. Performance Estimation in V2X Networks Using Deep Learning-Based M-Estimator Loss Functions in the Presence of Outliers / Alshahrani, A.; Muthanna, A.; Koucheryavy, A // Symmetry 2021, Vol. 13, Issue. 11, pp. 1-18.

13. Abdellah, A.R. Machine Learning Algorithm for Delay Prediction in IoT and Tactile Internet / Abdellah, A.R.; Mahmood, O.A.; Kirichek, R.; Paramonov, A.; Koucheryavy, A. // Future Internet 2021, Vol. 13, Issue. 12, 304, pp. 1-19.

14. Ali R. Abdellah, Deep learning approach for predicting energy consumption of drones based on MEC / Ali R. Abdellah, A. Alzaghir, A. Koucheryavy // NEW2AN 2021/ruSMART 2021, Springer Cham. LNCS, Vol. 13158, pp 284–296, 2022.

15. Abbas Alzaghir, Predicting energy consumption for UAV-enabled MEC using Machine Learning Algorithm / A. Alzaghir, Ali R. Abdellah, A. Koucheryavy // NEW2AN 2021/ruSMART 2021, Springer cham. LNCS, Vol. 13158, pp 297–309, 2022.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: официального оппонента Татарниковой Т.М., официального оппонента Степанова М.С., ведущей организации РУДН; Карташевского И.В., д.т.н., проф., профессора кафедры

программного обеспечения и управления в технических системах Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики; Комарова М.М., к.т.н., профессора департамента бизнес-информатики Научного исследовательского университета "Высшая школа экономики"; Самойлова А.Г., д.т.н., проф., профессора кафедры Радиотехники и радиосистем Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых; Вишневого В.М., д.т.н., проф., зав. лабораторией № 69 «Управление сетевыми системами» Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; Колбанёва М.О., д.т.н., проф., профессора кафедры информационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина); Никульского И.Е., д.т.н., с.н.с., главного специалиста, зам. главного конструктора ПАО «ЦНПО «Ленинец»; Васильева А.Б., к.т.н., заместителя генерального директора ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ»; Шувалова В.П., д.т.н., проф., профессора кафедры инфокоммуникационных систем и сетей Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики; Канаева А.К., д.т.н., проф., профессора и Логин Э.В. к.т.н., доцента кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

Все отзывы положительные, но имеются следующие критические замечания. Теоретический обзор по автомобильным сетям VANET следовало сделать более полным. В частности, из беспроводных технологий, которые могут использоваться в качестве основы для сети VANET, в разделе 2.3 диссертации, упоминается только Wi-Fi (IEEE 802.11p). При этом не рассматриваются технологии IEEE 802.15.4 или мобильные сети, а также не обосновывается выбор именно Wi-Fi для проведения моделирования. Название диссертации не совсем полно отображает область исследований и результаты работы, так как в нем упомянута только технология 5G. При этом одна из глав полностью посвящена автомобильным сетям VANET на основе технологии IEEE 802.11p. Утверждение о том, что "интеграция самоорганизующихся сетей, искусственного интеллекта

(AI) с сетями 5G позволит сети функционировать интеллектуально и автономно" не совсем верно в отношении автономного функционирования сети. Для сетей 5G такая задача не ставится. Она потенциально рассматривается для реализации для будущих сетей 6G. На стр. 46 для трехслойной сети прямого распространения целесообразно было бы указать численные значения числа нейронов для всех слоев, поскольку в представленном виде рисунок выглядит в целом неконкретно. На стр. 114 следовало бы более подробно обосновать как выбор эпох, так и оптимизатора Adam. В автореферате приводятся сравнения результатов прогнозирования нейронных сетей (Таблица 1, Таблица 2 и Таблица 3). В таблице 1 значение MAPE приведено в процентном виде, в других таблицах значения указаны без единиц измерения. Следует привести значения таблиц к единому виду. В тексте автореферата описываются технические характеристики программно-аппаратного комплекса для проведения моделирования. Данная информация не несет существенной смысловой нагрузки, поскольку не может и не должна влиять на результаты моделирования. Во второй и третьей главе указано, что сетевой трафик для обучения нейронных сетей был сгенерирован искусственно (с помощью эмуляторов). Поскольку сети Интернета вещей и VANET в настоящий момент уже находят своё широкое применение в различных отраслях народного хозяйства, то сетевой трафик следовало бы собрать в ходе натуральных экспериментов или отдельно предоставить характеристики рассматриваемого трафика в привязке к практическому применению. Не ясно, что означает «k4» в формуле (4) на стр. 11, где этим обозначением указаны количество входных задержек и количество выходных задержек. Если их числа одинаковы, то нужно было об этом сказать. Не ясно, зачем на стр. 13, а затем и на стр. 17 приведены марка и параметры используемого процессора. Известны процессоры с тактовой частотой выше 5 ГГц. Если важна была скорость и размер памяти при моделировании, то нужно было это оговорить дополнительно. Следовало пояснить, почему при оценке прогнозирования набор данных разделили именно так: 70% для обучения, 15% для тестирования, 15% для валидации, как указано на стр.13. В автореферате не приводится обоснования

выбора некоторых параметров моделей и алгоритмов машинного обучения, в частности, в модели для VANET (Глава 2) не объяснен выбор числа нейронов скрытого слоя, в модели долговременной краткосрочной памяти (Глава 4) - выбор числа эпох обучения. Также в автореферате не использованные методы нормализации данных. В качестве замечаний следует отметить следующее: из автореферата на стр. 8 неясно почему выбрана трехслойная нейронная сеть прямого распространения для оценки производительности сети VANET (потерь пакетов) с использованием робастных М-оценок? В автореферате на стр. 17 указано, что максимальное количество эпох для обучения составляет 1000 эпох, непонятно из каких соображений выбрано это количество? Автор работы уделил повышенное внимание разработке методологии прогнозирования задержки на основе алгоритмов нейронных сетей, вместе с этим прогнозирование вариации задержки не вошло в круг исследованных им вопросов. Из содержания автореферата не ясно как точность новых предложенных автором работы методов прогнозирования показателей качества обслуживания соотносится с точностью традиционных методов. Отсутствуют результаты сравнения предлагаемых методов прогнозирования на основе машинного обучения и нейронных сетей с классическими алгоритмами экстраполяции. Особенно интересным было бы сравнение по точности предсказаний, соотнесенное с аппаратными требованиями к вычислительному комплексу, выполняющему прогнозирование. В автореферате указано, что приемлемая для практики точность прогнозирования достигается при 500 скрытых нейронах, тогда как исследования проводились для случая 50, 200 и 500 скрытых нейронов. Следовало бы увеличить количество промежуточных шагов, а также провести проверку для большего числа нейронов, чтобы получить оптимальное решение. Из текста автореферата непонятно то, как получены кривые фактической пропускной способности, относительно которых автор делает ряд заключений и сравнивает результаты прогнозирования пропускной способности (рисунки 4, 5 и 6). В тексте автореферата не раскрыта оценка степени достижения цели исследования касаясь повышения точности прогнозирования.

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 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. Системы, сети и устройства телекоммуникаций. К.т.н., доцент М.С. Степанов работает в Московском техническом университете связи и информатики, хорошо известен своими трудами в области теории телетрафика и теории массового обслуживания применительно к современным сетям и системам связи. Ведущая организация – Российский университет дружбы народов за последние годы зарекомендовала себя крупными достижениями в области сетей и систем связи пятого и последующих поколений. Отзыв сформирован на кафедре прикладной информатики и теории вероятностей, заведующим которой является известный специалист в области сетей связи, д.т.н., профессор К.Е. Самуйлов, и подписан доцентом кафедры, к.ф.-м.н., доц. И.А. Кочетковой.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований: разработан метод прогнозирования потерь пакетов в сетях VANET на основе глубокого обучения и многослойной нейронной сети в условиях, когда данные искажены гауссовским шумом и случайными выбросами при использовании робастной справедливой оценки и робастной оценки Коши позволяет уменьшить среднеквадратичную ошибку более, чем в пять раз, а абсолютную ошибку примерно в 2 раза по сравнению с использованием метода наименьших квадратов; **предложен** метод прогнозирования пропускной способности сетей 5G/6G для трафика Интернета Вещей на основе алгоритма долговременной краткосрочной памяти (LSTM) обеспечивает результаты прогноза с приемлемой для практики точностью при 500 скрытых нейронах;

доказано, что метод прогнозирования задержки и потерь в сетях Интернета вещей и Тактильного Интернета на основе нелинейной рекуррентной авторегрессионной нейронной сети NARX дает наилучшие результаты при его обучении алгоритмом Левенберга-Марквардта, превосходя при этом алгоритм обучения Флетчера-Ривса и устойчивый алгоритм обучения по значениям среднеквадратичной ошибки и абсолютной ошибки на порядок и более как при прогнозировании на один шаг, так и при прогнозировании на несколько шагов; **введено** в прогнозирование характеристик трафика для сетей связи пятого поколения использование методов прогнозирования на несколько шагов вперед.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что: **доказано**, что применение робастных оценок для прогнозирования характеристик трафика для сетей связи пятого поколения в условиях, когда данные искажены гауссовским шумом и случайными выбросами, позволяет в несколько раз уменьшить среднеквадратичную и абсолютную ошибки; **применительно к проблематике диссертации результативно использованы** статистические методы робастного оценивания, методы машинного и глубокого обучения; **изложены** идеи об использовании методов машинного и глубокого обучения для прогнозирования характеристик трафика в сетях связи пятого поколения; **раскрыты** особенности применения нелинейных рекуррентных авторегрессионных нейронных сетей для прогнозирования задержки и потерь в сетях Интернета Вещей и Тактильного Интернета для прогнозирования трафика в сетях связи пятого поколения; **изучены** связи прогнозирования характеристик трафика в условиях, когда данные искажены гауссовским шумом и случайными выбросами; **проведена модернизация** существующих моделей и методов прогнозирования характеристик трафика с учетом возможностей использования методов машинного и глубокого обучения.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что: разработаны и внедрены материалы для лекций и практических занятий в рамках курсов для бакалавров, магистров и аспирантов в Санкт-Петербургском государственном университете

телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича; **определены** направление развития моделей и методов прогнозирования трафика сетей связи пятого и последующих поколений на основе использования методов машинного и глубокого обучения; **создана** модель для прогнозирования потерь пакетов в условиях сети VANET на основе робастных оценок, когда данные искажены гауссовским шумом и случайными выбросами; **представлены** рекомендации по использованию робастных оценок, а также различных алгоритмов для обучения нейронных сетей в условиях прогнозирования характеристик трафика в сетях связи пятого поколения.

Оценка достоверности результатов исследования выявила: для **экспериментальных работ** результаты получены с использованием хорошо известных пакетов программ для имитационного моделирования; **теория** построена на известных методах теории вероятностей, теории телетрафика, машинного и глубокого обучения, математической статистики; **идея** нахождения достаточного числа слоев нейронной сети по допустимой ошибке прогноза **базируется** на использовании современных достижений в области искусственного интеллекта для прогнозирования характеристик трафика сетей связи пятого поколения; **использовано** сравнение авторских данных и данных, полученных ранее по рассматриваемой тематике; **установлено** качественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике; **использованы** современные методики сбора и обработки исходной информации.

Личный вклад соискателя состоит в самостоятельном получении всех основных результатов диссертационной работы.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1. По робастным оценкам. В математических выражениях фигурируют какие-то константы. Что это за константы?
2. Какие графики приведены на слайдах 20, 28 и 37?

