

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 25 декабря 2024 г. № 16

О присуждении Гребенщиковой Александре Андреевне, гражданке Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Модели и методы прогнозирования сетевого трафика в гетерогенных сетях связи с учётом его статистических характеристик» по специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций принята к защите 09 октября 2024 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 Гребенщикова Александра Андреевна, 31 мая 1996 года рождения, работает старшим преподавателем на кафедре инфокоммуникационных систем 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.

В 2020 году соискатель окончила федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

с присвоением квалификации магистра по направлению подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». В 2024 году окончила освоение программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича».

Диссертация выполнена на кафедре инфокоммуникационных систем 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 – кандидат технических наук, доцент, Елагин Василий Сергеевич, основное место работы: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», кафедра инфокоммуникационных систем, доцент кафедры.

Оппоненты: 1. Кучерявый Евгений Андреевич, доктор технических наук, доцент, основное место работы: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Департамент электронной инженерии Московского института электроники и математики имени А. Н. Тихонова, профессор; 2. Маркелов Олег Александрович, кандидат технических наук, доцент, основное место работы: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», кафедра радиотехнических систем, доцент, и.о. заведующего кафедрой, дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, в своем положительном заключении, подписанном Синициным Владимиром Игоревичем, доктором физико-

математических наук, профессором, руководителем отделения 6, главным научным сотрудником, утвержденном Посыпкиным Михаилом Анатольевичем, членом-корреспондентом РАН, доктором физико-математических наук, доцентом, директором, указала, что представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой. Полученные автором результаты отличаются научной новизной и практической значимостью. Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Результаты апробированы на значимых научных конференциях. Основные научные результаты диссертации достаточно полно опубликованы в ведущих рецензируемых журналах. Название работы полностью отражает ее содержание, содержание диссертации соответствует пунктам 1, 8 и 18 специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций. На основании изложенного считают, что Гребенщикова Александра Андреевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Соискатель имеет 12 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 5, из них в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, – 3, в том числе 3 в изданиях, соответствующих искомой специальности, а также: 2 статьи в материалах конференций. Из них 2 работы опубликованы соискателем без соавторства. Общий объём авторского вклада в работы (без результатов интеллектуальной собственности) составляет 2,05 печ.л. из общего количества 2,6 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. Гребенщикова, А.А. Модели авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего ARIMA для прогнозирования сетевого трафика / А.А. Гребенщикова // Электросвязь. – 2024. – № 5. – С. 39-46. – DOI 10.34832/ELSV.2024.54.5.006. – EDN OUXNFB

2. Гребенщикова, А.А. Модели ARIMA-GARCH для прогнозирования сетевого трафика реального времени / А.А. Гребенщикова // Электросвязь. – 2024. – № 8. – С. 19-26. – DOI 10.34832/ELSV.2024.57.8.003. – EDN TYBESV.

3. Гребенщикова, А.А. Прогнозирование трафика трехмерной сети интернета вещей высокой плотности как многомерного случайного процесса / В.С. Елагин, А.А. Гребенщикова // Труды учебных заведений связи. – 2024. – Т. 10, № 4. – С. 38-47. – DOI 10.31854/1813-324X-2024-10-4-37-47. – EDN GCSJROF.

Публикации в других изданиях:

4. Гребенщикова, А.А. Модели авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего ARIMA с применением авторегрессионной условной гетероскедастичности / А.А. Гребенщикова, В.С. Елагин // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2022). XI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4-х т. – СПб.: СПбГУТ, 2022. – Том 1. – С. 370-372. – EDN MXUUVS.

5. Гребенщикова, А.А. Обзор модели авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего Arima для прогнозирования сетевого трафика / А.А. Гребенщикова, В.С. Елагин // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. X Юбилейная международная научно-техническая и научно-методическая конференция : сб. науч. ст. в 4-х т. – СПб.: СПбГУТ, 2022. – Том 1. – С. 266-271. – EDN PNYRPG.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: официального оппонента Кучерявого Е.А.; официального оппонента Маркелова О.А.; ведущей организации ФИЦ ИУ РАН; Куликова Н.А., канд. техн. наук, технического директора ООО «ПРОТЕЙ ТЛ»; Ибрагимов Р.З., канд. техн. наук, доцента кафедры фотоники в телекоммуникациях Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики; Кутлюярова Р.В., канд. техн. наук, доцента, старшего научного сотрудника НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники», и.о. заведующего кафедрой телекоммуникационных систем Уфимского университета науки и технологий; Бурдина А.В., д-ра техн. наук., доцента, советника генерального директора по инновациям АО «НПН ГОИ им. С.И. Вавилова»; Степанова С.Н., д-ра техн. наук., профессора, заведующего кафедрой сетей связи систем коммутации Московского технического университета связи информатики; Тонких Е.В., канд. техн. наук, заместителя

начальника отдела Ордена Трудового Красного Знамени Российского научно-исследовательского института радио имени М.И. Кривошеева; Карташевского И.В., д-ра техн.наук., доцента, заведующего научно-исследовательской лабораторией «Инновационные проекты» Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики.

Все отзывы положительные. Но есть критические замечания. На стр. 11 в рамках обсуждения применимости прогнозных моделей была отмечена одна из концепций сетей пятого и последующих поколений, для которой критически важно за короткий промежуток времени спрогнозировать возможные перегрузки на сети. При этом при упоминании высокомоощных систем, для которых более актуальными могут выступать модели и методы на основе искусственных нейронных сетей, конкретные примеры отсутствуют. Таким образом, требуются пояснения о конкретных технологиях в рамках высокомоощных систем для применения искусственных нейронных сетей в прогнозировании трафика. На стр. 26 для прогнозирования трафика помимо моделей ARIMA могут использоваться другие модели временных рядов, такие как модель SARIMA (season autoregressive integrated moving average). Хотя автором отмечена особенность таких сезонных моделей, в работе было бы полезно указать по какой причине для прогнозирования конкретного трафика не выбрана модель SARIMA. В четвертой главе автор приводит ряд аргументов и выводов по вопросам выбора продолжительности интервала прогнозирования и единичного интервала. Действительно, продолжительность интервала прогнозирования и единичных интервалов существенно влияет на результаты прогнозирования. Выбор величины единичного интервала зависит от таких факторов, как параметры канала связи, свойства трафика и характеристики системы управления. Однако, в работе после проведения исследования трафика на самоподобность не хватает уточнения по выбору конкретного периода агрегации данных для различных типов трафика (стр. 47, стр. 61). Автор во второй главе разработал алгоритм прогнозирования трафика гетерогенной сети пятого и последующих поколений на основе моделей авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего ARIMA и подробно продемонстрировал результаты по оценке остатков модели. Однако, после

применения предложенного метода прогнозирования отсутствуют дополнительные пояснения об изменении таких характеристик, как Q-тест Льюнг-Бокса и статистического теста Харке-Бера (рис. 16). На стр. 56 требуется расширить перечень инструментов, которые способны нормализовать данные и выровнять дисперсию на ряду с методикой Бокса-Кокса. На рис. 2 требуется пояснение к формулировке определений «точность» и «неточность» в рамках соответствия моделей исходным данным. На стр. 29 при рассмотрении области прогнозирования на основе искусственных нейронных сетей (ИНС), автором отмечается использование в таком роде подходов не только прошлых значений временного ряда, но и другие составляющие. Следует уточнить, какие инструменты, в отличие от линейных подходов, применяются при прогнозах на основе нейронных сетей. На стр. 51 при оценке модели ARIMA (1,1,2) автором были выявлены достаточно большие значения байесовского информационного критерия (Bayesian information criterion, BIC) и информационного критерия Акаике (AIC). Однако, разработанный алгоритм по подбору модели прогнозирования основывался только на критерии AIC. Таким образом, требуются обоснования выбора исключительно одного из критериев и в чем их отличительная особенность. В автореферате представлен значительный объем статистических методов, детализированное сравнение их вычислительных затрат (например, между ARIMA и ИНС) могло бы повысить практическую значимость полученных результатов. Технические аспекты реализации ИНС для прогнозирования многомерных процессов описаны достаточно кратко, примеры их применения могли бы дополнительно усилить работу автора. Отсутствует явное описание ограничений разработанных методов, что важно для их последующего внедрения. Автор приводит результаты анализа трафика на наличие свойств самоподобия, приводит значения коэффициента Херста, при этом неясно, используются ли эти свойства для задачи прогнозирования поведения трафика. В автореферате нет уточнения ограничений применения преобразования Бокса-Кокса в контексте сетевого трафика. На стр. 13 при введении теста Шапиро-Уилка следует указать условия применимости такого инструмента для сетевого трафика при прогнозировании на несколько шагов

вперед. При описании процедуры устранения тренда временного ряда, автор приводит в пример тест Дики-Фуллера. Однако, нужно предельно точно уточнить отдельное значение данного теста в рамках стационарности, в отличии от дифференцирования. В описании результатов второй главы на стр. 8 приводится информация о проведенном анализе трафика Интернета Вещей. Представляется целесообразным дать больше информации о сценарии с Интернетом вещей и о процессе получения трафика для исследования, его объеме и количестве повторов проведенного исследования, что дало бы более полное представление о проведенной автором работе. При этом есть понимание, что большой объем данных не может быть приведен в автореферате. В четвертой главе отсутствует явное выделение разработанной модели, что также представлялось бы целесообразным для однозначного соотнесения математических выражений к представляемой модели, в частности, и для более четкого представления работы, проделанной автором, в целом. На стр. 9 при описании модели ARIMA(1,5,4) следовало добавить уточнение про наличие остатков модели и оценить их нормальность и корреляцию с помощью Q-теста Льюнг–Бокса и тестов Харке-Бера.

Выбор оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что оппоненты являются известными учеными в области сетей и систем связи, а ведущая организация – несомненным лидером в ряде традиционных и новых междисциплинарных направлений отечественной и мировой науки и в том числе в области методов математического моделирования и методов прогнозирования. Д.т.н., профессор Е.А. Кучерявый работает в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» и является одним из ведущих ученых в области развития сетей и систем телекоммуникаций, имеющий большой опыт и существенные публикации в области сетей связи пятого и последующих поколений. К.т.н., доцент О.А. Маркелов работает в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», хорошо известен своими трудами в

области прогнозирования и исследования трафика в современных сетях и системах связи. Ведущая организация – Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» за последние годы зарекомендовала себя крупными достижениями в области сетей и систем связи пятого и последующих поколений. Отзыв принят на заседании секции Ученого Совета Федерального государственного учреждения ФИЦ ИУ РАН и подписан д.ф.-м.н., профессором, руководителем Отделения 6 ФИЦ ИУ РАН В.И. Синициным. В.И. Синицин является известным специалистом в области стохастического системного анализа и методов создания информационно-телекоммуникационных систем.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований: разработаны** модели и методы прогнозирования сетевого трафика с учетом его неоднородной структуры, позволяющие повысить точность прогнозирования трафика в гетерогенных сетях пятого и последующих поколений с расширением границ применимости полученных результатов; **предложены** модели ARIMA и ARIMA-GARCH для прогнозирования трафика интернета вещей и трафика реального времени на краткосрочном периоде и прогнозирование трафика трехмерной сети связи высокой плотности как многомерного случайного процесса; **доказано**, что использование аналитических методов прогнозирования для трафика интернета вещей и трафика реального времени в гетерогенной сети пятого и последующих поколений повышает точность прогнозирования на краткосрочном периоде, а трафик трехмерной сети высокой плотности в задачах прогнозирования целесообразно рассматривать как многомерный случайный процесс, размерность которого равна количеству узлов сети, производящих трафик.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что: доказано** на основе использования среднеквадратичной ошибки (RMSE) и средней абсолютной процентной ошибки (MAPE), что точность прогнозирования трафика гетерогенной сети пятого и последующих поколений можно повысить за счет использования как аналитических методов, так и методов на основе искусственных нейронных сетей; **применительно к проблематике диссертации**



**результативно использованы** комплекс существующих базовых методов исследования, в т.ч. методы теории телетрафика и теории массового обслуживания, теории вероятностей, математической статистики; **изложены** идея прогнозирования трафика трехмерной сети связи высокой плотности как многомерного случайного процесса с учетом взаимосвязи точек доступа в рамках такой сети, идея подбора одиночного лага в рамках формирования обучающей выборки для прогнозирования, условия подбора моделей прогнозирования и стадии прогнозирования разного типа трафика гетерогенной сети связи, тенденции развития исследования по прогнозированию трафика для маломощных систем и систем, обладающих высокой вычислительной мощностью; **раскрыты** характеристики трафика гетерогенной сети пятого и последующих поколений, модель трафика трехмерной сети связи высокой плотности; **изучены** метод Бокса-Кокса для нормализации данных, тесты Льюинг-Бокса, Лангранжа, Шапиро-Уилка и Харке-Бера для подбора моделей автотрегрессии и проинтегрированного скользящего среднего; **проведена модернизация** итеративного подхода к прогнозированию временных рядов Бокса-Дженкинса, моделей ARIMA, GARCH и LSTM, обеспечивающих получение новых результатов по повышению точности прогнозирования трафика гетерогенной сети пятого и последующих поколений.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что: разработаны и внедрены** методы прогнозирования объема трафика реального времени в гетерогенной сети пятого и последующих поколений на краткосрочном периоде на основе гибридной модели прогнозирования  $ARIMA(1,2,2)GARCH(2,0)$ , а также модель трафика трехмерной сети связи высокой плотности как многомерного случайного процесса и метод прогнозирования с использованием искусственной нейронной сети внедрены в систему специального назначения, разрабатываемую в рамках выполнения ОКР (шифр «Орфей-Эрго-2014») для анализа адекватности функционирования моделей пунктов управления из состава АСУ; также научные результаты использованы 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** перспективы практического использования предложенных методов прогнозирования в рамках гетерогенных сетей пятого и последующих поколений; **создана** система рекомендаций в виде алгоритмов подбора моделей прогнозирования для разного типа трафика гетерогенной сети пятого и последующих поколений; **представлены** аналитические модели, методы прогнозирования и методы трафика гетерогенной сети пятого и последующих поколений и метода на основе искусственных нейронных сетей.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:** для **экспериментальных работ** полученные результаты прогнозирования с помощью аналитических методов и методов на основе искусственных нейронных сетей подтверждают повышение точности прогнозирования трафика гетерогенной сети пятого и последующих поколений; **теория** построена на известных проверяемых данных в области исследования и прогнозирования временных рядов и согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации и по смежным отраслям в области эконометрики; **идея базируется** на применении моделей авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего, моделей GARCH и применении искусственных нейронных сетей для прогнозирования временных рядов; **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 тематике прогнозирования

временных рядов и трафика гетерогенной сети связи; **использованы** современная научная база и апробированные общенаучные методы исследования.

Личный вклад соискателя состоит в разработке метода прогнозирования объёма трафика гетерогенной сети пятого и последующих поколений на краткосрочном периоде на основе модели  $ARIMA(1,5,4)$ , что обеспечивает уменьшение ошибки точности прогнозирования до 19%, что на 60% меньше чем с использованием исходной модели  $ARIMA(1,1,2)$ ; метода прогнозирования объёма трафика реального времени в гетерогенной сети пятого и последующих поколений на краткосрочном периоде на основе гибридной модели прогнозирования  $ARIMA(1,2,2)GARCH(2,0)$  обеспечивает уменьшение ошибки точности прогнозирования на 8,5% при прогнозе на один шаг вперед и на 7,6% при прогнозе на два шага вперед; метода прогнозирования с использованием искусственной нейронной сети, что позволяет повысить эффективность прогнозирования до 35%.

В ходе защиты диссертации было высказано следующие критическое замечание о том, что для анализа остатков модели во втором положении применялся критерий Льюнг-Бокса и Шапиро-Уилка, однако были проигнорированы критерии Пирсона, и другие критерии для более высоких моментов случайной величины распределение статистических характеристик трафика.

Соискатель Гребенщикова А.А. в ходе заседания **ответила** на задаваемые ей вопросы, **согласилась с замечаниями** и привела собственную аргументацию.

Диссертационный совет установил, что диссертация «Модели и методы прогнозирования сетевого трафика в гетерогенных сетях с учётом его статистических характеристик» является законченной научно-квалификационной работой и соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а также пунктам 1, 8, 18 паспорта научной специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

На заседании 25 декабря 2024 года диссертационный совет принял решение присудить Гребенщиковой Александре Андреевне ученую степень кандидата

технических наук за решение научной задачи повышения точности прогнозирования сетевого трафика гетерогенной сети за счет аналитических методов и методов на основе искусственных нейронных сетей, имеющую значение для отрасли цифрового развития и связи, а также специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 6 докторов наук по научной специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 13, против – 1, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор



Гоголь Александр Александрович

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Владыко Андрей Геннадьевич

27 декабря 2024 года