

АННОТАЦИЯ
к диссертации Нурахов Едиль Сергазиевича на соискание степени
доктора философии (PhD) по образовательной программе
8D06102 – Компьютерная инженерия
на тему: «Разработка методов прогнозирования показателей качества в
5G Standalone сетях с использованием машинного обучения»

Актуальность темы исследования.

Сети пятого поколения 5G Standalone (5G SA) представляют собой новый этап развития телекоммуникационных систем, характеризующийся высокой степенью программной управляемости, виртуализацией сетевых функций и широким использованием сервисно-ориентированной архитектуры. В отличие от предыдущих поколений мобильной связи, архитектура 5G SA обеспечивает возможность гибкого управления сетевыми ресурсами, динамической адаптации параметров функционирования и реализации интеллектуальных механизмов мониторинга и управления сетью в режиме, близком к реальному времени.

Одновременно с расширением функциональных возможностей существенно возрастает сложность поведения сети. Состояние 5G SA определяется совместным влиянием большого количества факторов, включая число активных пользователей, характер генерируемого трафика, распределение радиоресурсов, параметры транспортной сети и механизмы управления. В результате показатели качества сети, такие как задержка передачи данных, пропускная способность и потери пакетов, могут изменяться нелинейным образом, а деградация производительности зачастую развивается как сложный переходный процесс.

Согласно спецификациям 3GPP TS 23.501 и TS 38.300, мониторинг состояния сети является неотъемлемой частью архитектуры 5G System и включает наблюдение параметров задержки, скорости передачи данных, информации о перегрузках и других показателей качества обслуживания. Развитие концепций Open RAN и программно-определяемых сетей дополнительно усиливает роль интеллектуального анализа сетевых данных, поскольку современные архитектуры предполагают использование механизмов автоматизированного принятия решений и адаптивного управления на основе наблюдаемого состояния сети.

В последние годы методы машинного обучения активно рассматриваются как перспективный инструмент анализа и прогнозирования поведения телекоммуникационных систем. Значительное количество исследований посвящено прогнозированию отдельных показателей качества сети, сетевого трафика и нагрузки. Однако большинство существующих работ основано либо на данных операторских сетей, содержащих большое количество неконтролируемых факторов, либо на симуляционных моделях, которые не всегда воспроизводят особенности функционирования реального программного стека 5G Standalone.

Использование данных коммерческих сетей ограничивает возможность проведения воспроизводимых экспериментов и выявления причинно-следственных зависимостей между параметрами системы и наблюдаемыми показателями качества. В свою очередь, симуляционные модели часто упрощают механизмы функционирования транспортного уровня, буферизации, распределения ресурсов и взаимодействия компонентов сети, что снижает достоверность получаемых результатов.

В связи с этим особую актуальность приобретает создание контролируемых воспроизводимых экспериментальных сред, позволяющих проводить многократные исследования сети в идентичных условиях, управлять параметрами нагрузки и получать достоверные экспериментальные данные для анализа поведения системы. Развитие открытых программных платформ Open5GS и srsRAN создаёт возможность построения подобных исследовательских стендов без использования дорогостоящего специализированного оборудования, что открывает новые возможности для изучения поведения сетей 5G Standalone.

Дополнительный научный интерес представляет исследование состояния сети как динамического процесса. В большинстве работ прогнозируются отдельные показатели качества, тогда как задача формирования интегрального представления состояния сети, исследования переходов между различными режимами функционирования и анализа прогнозируемости этих состояний представлена ограниченно. При этом именно способность заблаговременно выявлять приближение перегрузки или деградации является одной из ключевых предпосылок для построения интеллектуальных систем мониторинга и управления сетями следующего поколения.

Таким образом, актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью разработки методов анализа и прогнозирования состояния сети 5G Standalone на основе контролируемых воспроизводимых экспериментальных данных, исследования закономерностей деградации сети в условиях многопользовательской нагрузки и определения возможностей применения методов машинного обучения для краткосрочного прогнозирования состояния сети.

Цель диссертационной работы

Разработка методов прогнозирования показателей качества 5G Standalone сети на основе машинного обучения с использованием данных, полученных в контролируемой экспериментальной среде.

Задачи исследования:

- Разработать контролируемую экспериментальную 5G SA среду, обеспечивающую воспроизводимое исследование функционирования сети в различных режимах нагрузки
- Определить показатели качества 5G SA сети и исследовать их зависимости от параметров нагрузки и условий функционирования сети
- Сформировать структурированный набор экспериментальных данных, содержащий параметры сети и соответствующие показатели качества, пригодный для последующего анализа и обучения моделей
- Разработать и исследовать методы прогнозирования показателей качества 5G SA сети на основе машинного обучения и оценить возможность выявления деградации состояния сети в динамических сценариях нагрузки

Методы исследования:

Систематический обзор литературы, анализ стандартов 3GPP и O-RAN, построение воспроизводимой экспериментальной среды 5G Standalone, сетевые измерения и мониторинг, анализ временных рядов, статистический анализ данных, машинное обучение, регрессионные модели, методы классификации, нейронные сети для обработки временных последовательностей, прогнозирование состояния сети.

Объект исследования

Методы анализа и прогнозирования состояния сетей 5G Standalone на основе контролируемых экспериментальных данных и методов машинного обучения.

Предмет исследования

Методы прогнозирования состояния и показателей качества сетей 5G Standalone.

Научная новизна полученных результатов:

1. Реализована воспроизводимая среда контролируемых экспериментов для исследования состояния сети 5G Standalone.
2. Предложен подход к формированию набора данных для анализа и прогнозирования состояния сети, включающего параметры эксперимента, показатели качества сети и агрегированный показатель состояния сети
3. На основе полученных экспериментальных данных выявлена прогнозируемость состояния сети 5G Standalone и определён рабочий горизонт прогноза, позволяющий выявлять развитие деградации сети до перехода в критическое состояние.

Положения, выносимые на защиту:

4. Реализована воспроизводимая среда контролируемых экспериментов, обеспечивающая возможность исследования состояния сети 5G Standalone в повторяемых экспериментальных условиях.
5. Предложен подход к формированию набора данных, включающий агрегированный показатель состояния сети и классификацию состояний сети, обеспечивающий воспроизводимое исследование переходов сети между различными состояниями.
6. Установлено, что состояние сети 5G Standalone и агрегированный показатель состояния сети обладают прогнозируемостью, рабочий горизонт прогнозирования зависит от характера динамики изменения параметров сети.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Теоретическая значимость

Данное исследование вносит вклад в развитие методов анализа и прогнозирования состояния сетей 5G Standalone на основе контролируемых экспериментальных данных. В работе сеть рассматривается как динамическая система, состояние которой формируется под воздействием многопользовательской нагрузки, параметров конфигурации и условий функционирования. Предложен подход к агрегированному представлению состояния сети, позволяющий исследовать переходы между различными режимами её работы. Полученные результаты расширяют представления о закономерностях деградации производительности сетей 5G Standalone и особенностях прогнозируемости их состояния в условиях контролируемого эксперимента. Результаты исследования могут служить основой для дальнейшего развития методов интеллектуального мониторинга, прогнозирования и управления сетями нового поколения.

Практическая значимость

Практическая значимость работы заключается в разработке воспроизводимой экспериментальной среды 5G Standalone на базе Open5GS, srsRAN Project и ZeroMQ, обеспечивающей проведение контролируемых многопользовательских экспериментов

без использования специализированного радиочастотного оборудования. Разработанная среда позволяет исследовать влияние параметров нагрузки на показатели качества сети, формировать экспериментальные датасеты и проводить оценку методов машинного обучения в условиях, приближенных к реальному функционированию сети.

Разработанные методы анализа и прогнозирования могут быть использованы при создании систем мониторинга состояния сети, интеллектуальных средств поддержки принятия решений и перспективных механизмов управления в программно-определяемых сетях и архитектурах Open RAN. Полученные результаты также могут использоваться в научных исследованиях, образовательных целях и при разработке экспериментальных платформ для изучения сетей 5G и последующих поколений мобильной связи.

Объём и структура диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырёх основных глав, заключения и списка литературы. Общий объём работы составляет около 110 страниц, включая таблицы, рисунки и формулы. Список литературы насчитывает более 50 наименований.

Диссертация состоит из введения, четырёх основных глав, заключения и списка использованных источников.

В первой главе представлен обзор архитектуры сетей 5G Standalone, концепции Open RAN, показателей качества сети и современных методов анализа и прогнозирования состояния телекоммуникационных систем. Выполнен анализ существующих подходов, обоснована актуальность исследования и сформулированы основные научные задачи работы.

Во второй главе описана разработанная воспроизводимая экспериментальная среда 5G Standalone на базе Open5GS, srsRAN Project и ZeroMQ. Рассмотрены архитектура стенда, методы многопользовательской эмуляции, организация сбора телеметрии и формирование экспериментального датасета.

В третьей главе представлены результаты исследования поведения сети в условиях изменяющейся нагрузки. Выполнен анализ зависимостей между параметрами системы и показателями качества сети, предложен подход к агрегированному представлению состояния сети и исследованы процессы деградации производительности.

В четвёртой главе рассмотрены методы прогнозирования состояния сети на основе машинного обучения. Выполнено сравнение различных моделей прогнозирования, исследована прогнозируемость состояния сети в различных режимах функционирования и определены рабочие горизонты краткосрочного прогнозирования для контролируемых и стохастических сценариев.

В заключении приведены основные результаты исследования, сформулированы выводы и определены направления дальнейших исследований.

Апробация работы

Результаты работы обсуждались на научных семинарах факультета информационных технологий и искусственного интеллекта Казахского национального университета им. аль-Фараби, а также были представлены на международных конференциях:

- Казахстан математиктерінің бірінші конгресі (Алматы, Казахстан, 2025);

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 6 научных работ, из них 5 статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, и 1 статья в журнале, рекомендованном КОКЧВО Республики Казахстан.

– Nurakhov, Y., Mukhanbet, A., Aibagarov, S., & Imankulov, T. (2025). A Machine Learning Approach to Investigating Key Performance Factors in 5G Standalone Networks. *Electronics*, 14(19), 3817. <https://doi.org/10.3390/electronics14193817>

– Nurakhov, Y., Kassymbek, N., Marlambekov, D., Mukhanbet, A., & Imankulov, T. (2026). Bridging the Semantic Gap in 5G: A Hybrid RAG Framework for Dual-Domain Understanding of O-RAN Standards and srsRAN Implementation. *Applied Sciences*, 16(7), 3275. <https://doi.org/10.3390/app16073275>

– Nurakhov, Y., Aibagarov, S., Kassymbek, N., Mukhanbet, A., Kumalakov, B., & Imankulov, T. (2026). The Impact of Generative AI on 6G Network Architecture and Service. *Electronics*, 15(7), 1345. <https://doi.org/10.3390/electronics15071345>

– Nurakhov, Y., Kyzyrkanov, A., Otarbay, Z., & Lebedev, D. (2025). Adaptive Software-Defined Network Control Using Kernel-Based Reinforcement Learning: An Empirical Study. *Applied Sciences*, 15(23), 12349. <https://doi.org/10.3390/app152312349>

– Kyzyrkanov, A. E., Nurakhov, Y. S., Otarbay, Z., & Lebedev, D. V. (2026). Log-Driven Proximal Policy Optimization for Adaptive Traffic Control in Software-Defined Networks. *Applied Sciences*, 16(9), 4424. <https://doi.org/10.3390/app16094424>

– Nurakhov, Y., & Marlambekov, D. (2025). Implementation of a Reproducible 5G Standalone Testbed Using Open-Source Components. *Journal of Problems in Computer Science and Information Technologies*, 3(4), 39–47. <https://doi.org/10.26577/jpcsit202544>