

ОТЗЫВ

официального рецензента на диссертационную работу

Нурахова Едиля Сергазиевича на тему «Разработка методов прогнозирования показателей качества в 5G Standalone сетях с использованием машинного обучения», предоставленную на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности «8D06102 – Компьютерная инженерия»

№ п/п	Критерии	Соответствие критериям (подчеркнуть один из вариантов ответа)	Обоснование позиции официального рецензента (замечания выделить курсивом)
1.	Тема диссертации (на дату ее утверждения) соответствует направлениям развития науки и/или государственным программам	1.1 Соответствие приоритетным направлениям развития науки или государственным программам: 1) диссертация выполнена в рамках проекта или целевой программы, финансируемого(ой) из государственного бюджета (указать название и номер проекта или программы); 2) диссертация выполнена в рамках другой государственной программы (указать название программы); <u>3) диссертация соответствует приоритетному направлению развития науки, утвержденному Высшей научно-технической комиссией при Правительстве Республики Казахстан (указать направление).</u>	Тематика исследования охватывает сети 5G Standalone и Open RAN, а также прогнозирование показателей качества обслуживания с использованием методов машинного обучения, что в полной мере соответствует национальному приоритетному направлению развития информационных, коммуникационных и интеллектуальных технологий. В представленных материалах не указан номер конкретного государственного проекта, финансируемого из бюджета, поэтому оценка соответствия приоритетному направлению основывается на тематике исследования, которая является актуальной и стратегически значимой.



2.	Важность для науки	Работа <u>вносит/не вносит</u> существенный вклад в науку, а ее важность хорошо <u>раскрыта/не раскрыта</u> .	Диссертационная работа вносит значимый вклад в науку благодаря разработке полностью воспроизводимой экспериментальной методологии исследования сетей 5G SA без использования радиочастотного оборудования (Open5GS + srsRAN + ZeroMQ), а также установлению того, что деградация сети представляет собой наблюдаемый переходный процесс с краткосрочной прогнозируемостью, зависящей от режима функционирования сети. Ориентация исследования на воспроизводимость напрямую устраняет реально существующий и убедительно обоснованный пробел в научной литературе: несмотря на наличие зрелых результатов в области стандартов, O-RAN, экспериментальных стендов и прогнозирования, они редко интегрируются в единую воспроизводимую исследовательскую цепочку. Значимость полученных результатов чётко раскрыта во введении и заключении диссертации.
----	--------------------	---	--



3.	Принцип самостоятельности	Уровень самостоятельности:	Докторант продемонстрировал высокий уровень самостоятельности: самостоятельно спроектировал и реализовал экспериментальный стенд, организовал процесс сбора данных, разработал модель состояния сети и построил систему прогнозирования. Это подтверждается значительным количеством публикаций по теме исследования, в большинстве которых докторант является первым автором.
		1) <u>высокий</u> ;	
		2) средний;	
		3) низкий;	
4.	Принцип внутреннего единства	4) самостоятельности нет.	Актуальность исследования убедительно обоснована контекстом стандартизации 3GPP и O-RAN, расширением внедрения сетей 5G Standalone, а также проблемой соотношения воспроизводимости и реалистичности экспериментальных исследований, которая рассматривается в работе как центральное направление исследования.
		4.1 Обоснование актуальности диссертации:	
		1) <u>обоснована</u> ;	
		2) частично обоснована;	
		3) не обоснована.	
		4.2 Содержание диссертации отражает тему диссертации:	Экспериментальный стенд, анализ деградации сети, модель состояния сети и
		1) <u>отражает</u> ;	



		2) частично отражает;	прогнозирование KPI в совокупности полностью отражают заявленную тему диссертационного исследования, посвящённого прогнозированию показателей качества в сетях 5G SA с использованием методов машинного обучения.
		3) не отражает.	
		4.3. Цель и задачи соответствуют теме диссертации:	Заявленные цель и задачи исследования соответствуют теме диссертации. Вместе с тем следует отметить, что задачи 10–11, связанные с исследованием и сравнительной оценкой методов управления параметрами сети, рассмотрены преимущественно на концептуальном уровне и не сопровождаются отдельным экспериментальным исследованием.
		1) <u>соответствуют</u> ;	
		2) частично соответствуют;	
		3) не соответствуют.	
		4.4 Все разделы и положения диссертации логически взаимосвязаны:	Главы 1–4 образуют логически последовательную и хорошо взаимосвязанную структуру исследования (архитектура и постановка проблемы → экспериментальный стенд → анализ деградации и модель состояния сети → прогнозирование). Вместе с тем во введении заявлена пятая
		1) <u>полностью взаимосвязаны</u> ;	
		2) взаимосвязь частичная;	
		3) взаимосвязь отсутствует.	



			глава, посвящённая элементам управления и воздействия на сеть, а задачи 10–11 также формируют соответствующие ожидания. Однако в представленном тексте диссертации отдельная глава по данной тематике отсутствует. Это оставляет направление, связанное с управлением сетью, недостаточно раскрытым и несколько снижает общую логическую завершённость работы.
		4.5 Предложенные автором новые решения (принципы, методы) аргументированы и оценены по сравнению с известными решениями:	Автор проводит критическое сопоставление групп источников (таблицы 1–2: сравнительный анализ ключевых источников и карта проблемных направлений с указанием их ограничений) и на основе данного анализа формулирует исследовательский пробел, а не ограничивается простым перечислением ранее выполненных работ.
		1) критический анализ есть;	
		2) анализ частичный;	
		3) анализ представляет собой не собственные мнения, а цитаты других авторов;	
5.	Принцип научной новизны	4) анализ отсутствует.	
		5.1 Научные результаты и положения являются новыми?	Отдельные компоненты исследования (Open5GS, srsRAN, ZeroMQ, а также стандартные модели машинного и глубокого обучения) являются
		1) полностью новые;	
		2) частично новые (новыми являются 25-75%);	
		3) не новые (новыми являются менее 25%).	



			известными и широко применяемыми решениями. Научная новизна работы заключается в их интеграции в единую воспроизводимую методологию исследования, разработке интерпретируемой модели состояний сети «нормальное состояние → загруженное состояние → деградированное состояние → колебательное состояние», а также агрегированного показателя state_score. Это представляет собой существенную, но частичную научную новизну, характерную для диссертационной работы инженерно-интеграционного характера.
		5.2 Выводы диссертации являются новыми?	Установленный в работе факт того, что деградация сети 5G SA представляет собой наблюдаемый переходный процесс, обладающий краткосрочной прогнозируемостью, зависящей от режима функционирования сети (устойчивые горизонты прогнозирования порядка 1–5 секунд и более длительные горизонты в условиях фазово-структурированной нагрузки),
		1) полностью новые;	
		<u>2) частично новые (новыми являются 25-75%);</u>	
		3) не новые (новыми являются менее 25%).	



			является новым и практически полезным научным результатом. Вместе с тем данный вывод опирается на известные принципы формирования очередей, bufferbloat и методы прогнозирования временных рядов.
		5.3 Технические, технологические, экономические или управленческие решения являются новыми и обоснованными:	Воспроизводимый многопользовательский экспериментальный стенд без использования радиочастотного оборудования и автоматизированный конвейер сбора телеметрии представляют собой обоснованный и практически ценный инженерный вклад. Научная новизна данных решений является частичной и определяется особенностями их интеграции и автоматизации в рамках единой исследовательской платформы.
		1) <u>полностью новые</u> ;	
		2) частично новые (новыми являются 25-75%);	
		3) не новые (новыми являются менее 25%).	
6.	Обоснованность основных выводов	Все основные выводы <u>основаны</u> /не основаны на весомах с научной точки зрения доказательствах либо достаточно хорошо обоснованы (для qualitative research (куолитатив ресеч) и направлений подготовки по искусству и гуманитарным наукам).	Основные выводы диссертации основаны на результатах контролируемых и воспроизводимых экспериментов, а также на методологически корректном конвейере прогнозирования без утечки данных (no-leakage) с



			временным разделением выборок на обучающую и тестовую. Это является одной из существенных сильных сторон исследования. Вместе с тем следует отметить, что результаты прогнозирования представлены преимущественно в качественной форме и в виде графиков; конкретные числовые значения заявленных метрик (MAE, RMSE, R^2, ROC-AUC, PR-AUC) не сведены в отдельные таблицы, что ограничивает возможности количественной проверки полученных результатов. Достоверность выводов могла бы быть дополнительно усилена представлением явных таблиц результатов для каждой модели и каждого горизонта прогнозирования.
7.	Основные положения, выносимые на защиту	Необходимо ответить на следующие вопросы по каждому положению в отдельности:	Положения, выносимые на защиту (воспроизводимый экспериментальный стенд; рассмотрение деградации как переходного процесса, обусловленного накоплением очередей и ограничениями транспортной подсистемы;
		7.1 Доказано ли положение?	
		1) <u>доказано</u> ;	
		2) скорее доказано;	
		3) скорее не доказано;	
		4) не доказано;	



		5) в текущей формулировке проверить доказанность положения невозможно.	интерпретируемая модель состояния сети; краткосрочная прогнозируемость KPI, связанных с задержкой), убедительно обоснованы и не являются тривиальными. Они оцениваются как «скорее доказанные», а не полностью доказанные, поскольку подтверждающие результаты представлены преимущественно в качественной форме и получены на одном эмулируемом экспериментальном стенде. Представленные положения обладают научной новизной, имеют средний уровень практической применимости (в условиях контролируемого экспериментального стенда) и подтверждаются публикациями автора в рецензируемых научных изданиях.
		7.2 Является ли тривиальным?	
		1) да;	
		2) <u>нет</u> ;	
		3) в текущей формулировке проверить тривиальность положения невозможно.	
		7.3 Является ли новым?	
		1) <u>да</u> ;	
		2) нет;	
		3) в текущей формулировке проверить новизну положения невозможно.	
		7.4 Уровень для применения:	
		1) узкий;	
		2) средний;	
		3) <u>широкий</u> ;	
		4) в текущей формулировке проверить уровень применения положения невозможно.	
		7.5 Доказано ли в статье?	
		1) <u>да</u> ;	
		2) нет;	
		3) в текущей формулировке проверить доказанность положения в статье невозможно.	
8.	Принцип достоверности.	8.1 Выбор методологии - обоснован или методология достаточно подробно описана:	Компоненты экспериментального стенда, механизм изоляции пользователей на основе пространств имён (multi-UE namespaces), сценарии формирования нагрузки и
	Достоверность источников и предоставляемой информации	1) <u>да</u> ;	
		2) нет.	



			протокол проведения экспериментов описаны с достаточной степенью детализации, обеспечивающей возможность воспроизведения представленных результатов.
	8.2 Результаты диссертационной работы получены с использованием современных методов научных исследований и методик обработки и интерпретации данных с применением компьютерных технологий:		В ходе исследования использовались современные программные средства и методы, включая открытые программные стеки 5G SA, автоматизированный сбор телеметрии, а также современные модели машинного и глубокого обучения (Random Forest, Extra Trees, HistGradientBoosting, Ridge, GRU/LSTM), реализованные в рамках методологически корректного конвейера прогнозирования без утечки данных (leakage-free pipeline).
	1) <u>да</u> ;		
	2) нет.		
	8.3 Теоретические выводы, модели, выявленные взаимосвязи и закономерности доказаны и подтверждены экспериментальным исследованием (для направлений подготовки по педагогическим наукам результаты доказаны на основе педагогического эксперимента):		Предложенная модель состояний сети и выявленные механизмы деградации подтверждаются результатами анализа экспериментальных временных рядов. Вместе с тем данное подтверждение ограничено условиями эмулируемой экспериментальной среды;
	1) <u>да</u> ;		
	2) нет.		



			валидация результатов на данных реальных операторских сетей или в условиях радиоинтерфейса (over-the-air) не проводилась и могла бы дополнительно повысить достоверность полученных результатов.
		8.4 Важные утверждения <u>подтверждены</u> /частично подтверждены/не подтверждены ссылками на актуальную и достоверную научную литературу.	Ключевые положения исследования подтверждаются авторитетными первоисточниками, включая документы 3GPP TS 23.501 и TS 38.300, материалы O-RAN Alliance, отчёт NIST TN 2311, документацию srsRAN, а также релевантные научные публикации, посвящённые прогнозированию и анализу процессов формирования очередей в сетях связи.
		8.5 Использованные источники литературы <u>достаточны</u> /не достаточны для литературного обзора.	Список литературы, включающий 41 источник, в достаточной степени охватывает стандарты, экспериментальные стенды и методы прогнозирования. В качестве рекомендации следует отметить, что ряд источников представлен нерцензуемыми веб-ресурсами и материалами поставщиков решений (например, обучающими и



			справочными интернет-ресурсами). Замена таких источников на первоисточники или публикации в рецензируемых научных изданиях позволила бы повысить научный уровень обзора литературы.
9	Принцип практической ценности	9.1 Диссертация имеет теоретическое значение:	Интерпретируемая модель состояния сети и формализация процесса деградации как переходного процесса, зависящего от режима функционирования сети, обладают теоретической ценностью для задач наблюдаемости, мониторинга и анализа состояния сетей связи.
		1) <u>да</u> ;	
		2) нет.	
		9.2 Диссертация имеет практическое значение и существует высокая вероятность применения полученных результатов на практике:	Воспроизводимый экспериментальный стенд и использование KPI, основанных на показателях задержки, для раннего выявления признаков деградации сети могут быть непосредственно применены в задачах мониторинга, прототипирования приложений RIC/xApp и предварительной оценки сетевых решений без необходимости использования радиочастотного оборудования.
		1) <u>да</u> ;	
		2) нет.	
		9.3 Предложения для практики являются новыми:	Предложенный подход к



		1) полностью новые;	раннему выявлению признаков деградации сети и разработанная воспроизводимая экспериментальная платформа обладают частичной научной новизной и создают практическую основу для дальнейшего развития средств мониторинга и управления сетями связи.
		2) <u>частично новые (новыми являются 25-75%);</u>	
		3) не новые (новыми являются менее 25%).	
10.	Качество написания и оформления	Качество академического письма:	Диссертация имеет логичную структуру и изложена в доступной для восприятия форме. Исследование характеризуется последовательностью изложения материала, чёткой аргументацией и содержательными промежуточными выводами. Вместе с тем качество оформления оценивается как среднее в связи с наличием редакционных недочётов, требующих исправления: дублирования и несогласованности нумерации (две таблицы с обозначением «Таблица 1», повторяющийся заголовок раздела «3.4», переход от раздела 3.7 сразу к разделу 3.10, смешение различных стилей нумерации
		1) высокое;	
		2) <u>среднее;</u>	
		3) ниже среднего;	
		4) низкое.	



			рисунков, например «Рисунок 6» и «Рисунок 3.16»), отдельными артефактами перевода, а также использованием графических иллюстраций в случаях, когда более уместным было бы представление результатов в виде числовых таблиц.
11.	Замечания к диссертации	Основными рекомендациями по совершенствованию работы являются: (1) представление результатов в виде явных числовых таблиц для каждой модели и каждого горизонта прогнозирования с указанием метрик MAE, RMSE, R^2 , ROC-AUC и PR-AUC вместо преимущественно качественного описания точности; (2) приведение в соответствие заявленных целей и задач исследования с фактическим содержанием диссертации, поскольку анонсированное исследование контуров управления и методов управления параметрами сети (задачи 10–11 и упомянутая во введении пятая глава) не представлено в виде отдельного экспериментального раздела и требует либо дополнительного раскрытия, либо корректировки формулировок области исследования; (3) более подробное обсуждение ограничений внешней валидности эмуляции на основе ZeroMQ, связанных с отсутствием реальных эффектов радиоканала, а также определение возможных направлений последующей валидации результатов на базе USRP-платформ, в условиях радиоинтерфейса (over-the-air) или на данных операторских сетей; (4) устранение отмеченных выше ошибок нумерации и редакционных несоответствий. Следует отметить, что указанные замечания не носят принципиального характера и представляют собой рекомендации, направленные на дальнейшее усиление уже сформированного и содержательного научного исследования.	
12.	Научный уровень статей докторанта по теме исследования (в случае защиты диссертации в форме серии статей официальные рецензенты комментируют научный уровень каждой статьи докторанта по теме	Публикационная активность докторанта по теме диссертационного исследования является высокой для уровня PhD и включает семь научных статей, опубликованных в журналах <i>Electronics</i> и <i>Applied Sciences</i> (MDPI). Публикации охватывают вопросы применения методов машинного обучения для анализа факторов, влияющих на KPI сетей 5G SA, использования методов RAG/LLM для систем O-RAN и srsRAN, применения генеративного искусственного интеллекта в архитектуре 6G, методов обучения с подкреплением для управления SDN-сетями, а также разработки воспроизводимого экспериментального стенда 5G SA. Кроме того, результаты исследования представлены в рецензируемых материалах научной конференции. В большинстве публикаций докторант является	

	исследования)	первым автором. Представленные работы тематически связаны с диссертацией и обеспечивают достаточную научную апробацию положений, выносимых на защиту. В качестве рекомендации для дальнейшего развития научной деятельности можно отметить целесообразность публикации результатов в высокорейтинговых изданиях IEEE и ACM, что позволит повысить международную видимость исследований. Вместе с тем текущий уровень публикационной активности полностью соответствует и даже превышает ожидаемые требования к научным результатам докторанта.
13.	Решение официального рецензента (согласно пункту 28 настоящего Типового положения)	На основании изложенного диссертация Едиля Нурахова представляет собой завершённую, самостоятельную и обладающую научной ценностью работу, в которой решена актуальная научно-техническая задача и результаты которой подтверждаются значительным количеством публикаций в рецензируемых научных изданиях. Отмеченные замечания, касающиеся количественного представления метрик прогнозирования, вопросов управления и контуров обратной связи, ограничений эмулируемой среды, а также отдельных редакционных исправлений, носят рекомендательный характер и не снижают общей положительной оценки диссертационного исследования. Решение: присудить Едилю Нурахову степень доктора философии (PhD).

*Настоящая русскоязычная версия является переводом оригинального отзыва, подготовленного на английском языке. В случае возникновения каких-либо расхождений, несоответствий или различий в толковании между русской и английской версиями приоритетной и официальной считается английская версия отзыва.

*This Russian-language version is a translation of the original review prepared in English. In the event of any discrepancy, inconsistency, or difference in interpretation between the Russian and English versions, the English version shall prevail and be considered the official version of the review.

Official Reviewer:

**Associate Professor (Network Security),
6G Innovation Centre (6GIC),
University of Surrey, United Kingdom**

(place of work, academic title)



(signature)

MOHAMMAD SHOJAFAR
(FULL NAME)