

РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационен труд за придобиване на образователна и научна степен „доктор“ в професионално направление 5.3 Комуникационна и компютърна техника по докторска програма „Комуникационни мрежи и системи“

Автор на дисертационния труд: **инж. Атанас [REDACTED] Влахов**

Тема на дисертационния труд: **„Интелигентно управление на мрежи за достъп с отворени интерфейси за реализация на услуги, критични към качеството на обслужване“**

Рецензент: **проф. д-р Георги [REDACTED] Илиев**

1. Актуалност на разработвания в дисертационния труд проблем

През последните години телекомуникационната индустрия преживява основна трансформация, обусловена от експоненциалния ръст на мобилния трафик и появата на нови услуги. Навлизането на петото 5G и подготовката за шестото 6G поколение мобилни мрежи изисква поддръжка на разнообразни сценарии на употреба - от масова комуникация между машини (mMTC) до свръхнадеждна комуникация с ниска латентност (URLLC).

Редица приложения като автономна мобилност, индустриална автоматизация, виртуална и добавена реалност (VR/AR) и холографско телеприсъствие налагат много строги изисквания към качеството на услугата (QoS) и качеството на потребителското преживяване (QoE). Класическите мрежови архитектури за радиодостъп (RAN) са монолитни, зависими от специализиран хардуер и със затворени интерфейси, което ограничава тяхната гъвкавост и забавя иновациите.

Този широк и хетерогенен спектър от сценарии налага разработването на гъвкави, мащабируеми и програмируеми мрежи, които могат да гарантират ултра-висока надеждност и ниско закъснение, осигурявайки безкомпромисно качество на обслужването и нива на качество на преживяване за крайните потребители в динамична среда.

В отговор на тези изисквания се появява концепцията за мрежа за достъп с отворени интерфейси (Open RAN), която въвежда принципите на деагрегация и виртуализация. Динамичната природа на радио-средата и хетерогенността на услугите налага интегрирането на изкуствен интелект

(AI) и машинно обучение (ML) за постигане на автоматизация в реално време и динамично разпределение на мрежовите ресурси.

В дисертационният труд са разгледани проектирането и разработването на ефективни методи и алгоритми за подобряване на QoS и QoE, чрез интегриране на изкуствен интелект (AI) в мрежовите операции за оптимизиране на тяхната производителност. Всичко това определя актуалността на тематиката на представения дисертационен труд. Тази актуалност се потвърждава и от големия брой научни и практически разработки в тази област, публикувани през последните няколко години.

2. Степен на познаване на състоянието на проблема и творческа интерпретация на литературния материал

Докторантът демонстрира задълбочено познаване на проблемите в изследваната област. Разгледани са голям брой литературни източници и е направен критичен анализ на съществуващите до момента решения в областта на мрежите за достъп с отворени интерфейси Open RAN. Въз основа на това правилно са формулирани целта на дисертационния труд и задачите за нейното постигане. Позицията на автора и творческият му принос ясно са изразени в дисертационния труд и представените публикации.

3. Съответствие на избраната методика на изследване с поставената цел и задачи на дисертационния труд

Детайлният анализ на публикациите и изследванията в научната литература дава възможност ясно да се дефинират целта и задачите на дисертационния труд. Основната цел на дисертационния труд е да предложи цялостна методология за подобряване на QoS и QoE, чрез интегриране на изкуствен интелект в мрежовите операции за оптимизиране на тяхната работа. Необходимо е мрежовите операции да са интегрирани в Open RAN архитектурата, за да поддържат различни случаи на употреба с хетерогенни изисквания за QoS/QoE по отношение на честотна лента, латентност, загуба на пакети и джитер. За постигане на тази цел са формулирани пет основни задачи, свързани с: 1) анализ и систематизация на архитектурната еволюция на RAN и прехода към отворени и виртуализирани архитектури; 2) проектиране и реализация на пълнофункционална експериментална O-RAN

тестова среда; 3) разработване на алгоритми за откриване на аномалии чрез модели за дълбоко обучение; 4) моделиране и прогнозиране на QoS и QoE при интерактивни мултимедийни услуги; 5) оптимизиране на мрежовите ресурси чрез механизми за интелигентна класификация на трафика и динамично разпределение на радиоресурсите.

Разработените методи и предложените подходи, са изследвани и анализирани посредством симулационни експерименти. Направени са сравнения и анализи на резултатите от симулационните експерименти с такива получени чрез аналитични изчисления. Считаю, че приложената методологията на изследванията в дисертацията базирана на аналитични, статистически и симулационни подходи, както и използваните подходи и средства за анализ са адекватни на поставената цел и задачи на дисертационния труд.

4. Характеристика на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 193 страници. Той съдържа 70 фигури и 13 таблици. В труда са цитирани 138 литературни източника на латиница, като 80% от тях са от последните десет години.

Трудът има осем глави. Първа глава представя изчерпателен анализ на историческото развитие и архитектурната еволюция на мрежите за радиодостъп. Глава 2 е посветена на задълбочено изследване на теоретичните основи и практическите аспекти на интегрирането на изкуствения интелект и машинното обучение в съвременните мрежи за радиодостъп. В глава 3 е представено детайлно изследване и дефиниране на съвременните мултимедийни и интерактивни услуги, които поставят най-високи изисквания към производителността на безжичните мрежи. Специално внимание е отделено на спецификата на виртуалната реалност и нейните изисквания за ултраниска латентност и широка честотна лента. В глава 4 са анализирани две от най-масово използваните тестови платформи в световен мащаб: COLOSSEUM и POWDER. Проектирана, аргументирана и реализирана е собствена експериментална O-RAN тестова мрежа, която служи като фундамент за валидация на предложените в дисертацията алгоритми. В глава 5 са представени проектирането, внедряването и оценката на интелигентни системи за откриване на аномалии, които са критични за

осигуряването на сигурността и надеждността на мобилните мрежи. Шеста глава от дисертационния труд разглежда фундаменталната необходимост от преход от статична към динамична и прогнозна оценка на качеството на потребителското преживяване (QoE) в съвременните мобилни мрежи. Глава 7 разглежда проблематиката на прогнозирането на качеството на услугата (QoS) в сценарии за комуникация от типа „превозно средство към всичко“ (C-V2X). Осма глава представя практическото затваряне на цикъла за интелигентно управление в мобилните мрежи, преминавайки от фазите на мониторинг и прогнозиране към етапа на реална оптимизация и изпълнение.

Съдържанието на отделните глави е добре балансирано и е структурирано в раздели, които напълно отразяват описанието на предложените методи и алгоритми или анализа на проведените експериментални изследвания.

5. Приноси в дисертационния труд

Приносите в дисертационния труд са свързани с разработването на ефективни методи и алгоритми за подобряване на QoS и QoE, чрез интегриране на изкуствен интелект. Постигнатите резултати са с научно-приложен характер и могат да се обобщят както следва:

- Разработен е подход за интеграция на ML модели в Open RAN архитектура. Очертани са концептуалните и архитектурни предпоставки за използване на AI/ML в Open RAN, включително позиционирането на обучените модели в рамките на RIC.

- Дефиниране на потребителско-центричен подход към QoE и неговата връзка с QoS. Разгледани са влияещите фактори върху QoE (човешки, системни, контекстуални и свързани със съдържанието) и са анализирани корелационни модели, които свързват QoS с QoE.

- Разработена е концептуална рамка за класификация на аномалиите в мобилни мрежи, която отчита еволюцията от точкови към контекстуални и колективни аномалии и спецификата на времевите редове, висока размерност и класов дисбаланс.

- Разработен е трансформаторен модел за откриване на аномалии в архитектурата на O-RAN тестовата мрежа. Разработеният модул за детекция на аномалии е внедрен като микроуслуга в аналитичния слой на NWDAF и

демонстрира възможност за анализ на трафика в близко до реалното време (near-real-time) и уведомяване за настъпили абнормални събития.

Считам, че тези приноси правилно отразяват постигнатото от автора в процеса на проведените изследвания и несъмнено ще намерят своята практическа приложимост.

6. Преценка на публикациите по дисертационния труд.

По темата на дисертационния труд са направени 14 публикации, от които 9 в материали на международни научни конференции, 4 статии в научни списания и 1 глава от книга. В пет от публикациите докторантът е първи автор. Публикациите отразяват съществените моменти от дисертационния труд.

7. Оценка на автореферата на дисертацията.

Представеният автореферат е направен в съответствие с изискванията и отразява достатъчно пълно основното съдържание на дисертационния труд и неговите приносни резултати.

8. Препоръки и критични бележки.

Забележките имат редакционен характер. Някои от фигурите са трудни за разчитане. Съдържанието на отделните глави може да се съкрати, като се премахне ненужно описателната част в началото. Приносите, така както са представени в края на труда, биха могли да се преформулират, като някои от тях се обобщят или премахнат.

9. Заключение

Въз основа на изложеното считам, че дисертационният труд отговаря на изискванията на Закона за развитие на академичния състав в Република България и Правилника за неговото приложение и има необходимите качества, за да се присъди на неговия автор, маг. инж. Атанас [REDACTED] Влахов, научната и образователна степен „доктор“.

17.06.2026 г.
София

Подпис: [REDACTED]
(проф. д-р Георги Илиев)

OTL 28-HE1-094

18-06-2026



REVIEW

on a dissertation for the acquisition of the educational and scientific degree of "Doctor" in the professional field 5.3 Communication and Computer Engineering under the doctoral program "Communication Networks and Systems"

Author of the dissertation: **Eng. Atanas [REDACTED] Vlahov**

Topic of the dissertation: **„Intelligent management of access networks with open interfaces for the implementation of QoS-critical services“**

Reviewer: **Prof. Dr. Georgi [REDACTED] Iliev**

1. Relevance of the problem developed in the dissertation

In recent years, the telecommunications industry has been experiencing a major transformation, driven by the exponential growth of mobile traffic and the emergence of new services. The advent of the fifth generation 5G and the preparation for the sixth generation 6G mobile networks requires support for a variety of usage scenarios - from massive machine-to-machine communication (mMTC) to ultra-reliable low-latency communication (URLLC).

A number of applications such as autonomous mobility, industrial automation, virtual and augmented reality (VR/AR), and holographic telepresence impose very stringent requirements on quality of service (QoS) and quality of experience (QoE). Classic radio access network (RAN) architectures are monolithic, dependent on specialized hardware, and with closed interfaces, which limits their flexibility and slows down innovation.

This broad and heterogeneous spectrum of scenarios necessitates the development of flexible, scalable and programmable networks that can guarantee ultra-high reliability and low latency, delivering uncompromising quality of service and quality of experience levels for end users in a dynamic environment.

In response to these requirements, the concept of an open access network (Open RAN) emerged, which introduces the principles of disaggregation and virtualization. The dynamic nature of the radio environment and the heterogeneity of services necessitate the integration of artificial intelligence (AI) and machine

learning (ML) to achieve real-time automation and dynamic allocation of network resources.

The dissertation examines the design and development of effective methods and algorithms for improving QoS and QoE by integrating artificial intelligence (AI) into network operations to optimize their performance. All this determines the relevance of the topic of the presented dissertation work. This relevance is also confirmed by the large number of scientific and practical developments in this field, published in the last few years.

2. Degree of knowledge of the state of the problem and creative interpretation of the literary material

The doctoral student demonstrates in-depth knowledge of the problems in the research area. A large number of literature sources have been reviewed and a critical analysis of the existing solutions in the field of access networks with open interfaces Open RAN has been made. Based on this, the goal of the dissertation and the tasks for its achievement are correctly formulated. The author's position and creative contribution are clearly expressed in the dissertation and the presented publications.

3. Compliance of the chosen research methodology with the set goal and objectives of the dissertation work

A detailed analysis of publications and research in the scientific literature makes it possible to clearly define the purpose and objectives of the dissertation work. The main objective of the dissertation is to propose a comprehensive methodology for improving QoS and QoE by integrating artificial intelligence into network operations to optimize their performance. Network operations need to be integrated into the Open RAN architecture to support different use cases with heterogeneous QoS/QoE requirements in terms of bandwidth, latency, packet loss and jitter. To achieve this goal, five main tasks have been formulated, related to: 1) analysis and systematization of the architectural evolution of RAN and the transition to open and virtualized architectures; 2) design and implementation of a

fully functional experimental O-RAN test environment; 3) development of anomaly detection algorithms using deep learning models; 4) modeling and prediction of QoS and QoE in interactive multimedia services; 5) optimization of network resources through mechanisms for intelligent traffic classification and dynamic allocation of radio resources.

The developed methods and proposed approaches have been studied and analyzed through simulation experiments. Comparisons and analyses of the results of the simulation experiments with those obtained through analytical calculations have been made. I believe that the applied research methodology in the dissertation based on analytical, statistical and simulation approaches, as well as the used approaches and tools for analysis, are adequate to the set goal and objectives of the dissertation work.

4. Characteristics of the dissertation work

The dissertation is 193 pages long. It contains 70 figures and 13 tables. The work cites 138 literary sources in Latin, 80% of which are from the last ten years.

The work has eight chapters. Chapter one presents a comprehensive analysis of the historical development and architectural evolution of radio access networks. Chapter 2 is dedicated to an in-depth study of the theoretical foundations and practical aspects of integrating artificial intelligence and machine learning into modern radio access networks. Chapter 3 presents a detailed study and definition of modern multimedia and interactive services, which place the highest demands on the performance of wireless networks. Special attention is paid to the specifics of virtual reality and its requirements for ultra-low latency and wide bandwidth. Chapter 4 analyzes two of the most widely used test platforms worldwide: COLOSSEUM and POWDER. An own experimental O-RAN test network is designed, argued and implemented, which serves as a foundation for validation of the algorithms proposed in the dissertation. Chapter 5 presents the design, implementation, and evaluation of intelligent anomaly detection systems that are critical for ensuring the security and reliability of mobile networks. Chapter six of the dissertation examines the fundamental need for a transition from static to

dynamic and predictive quality of experience (QoE) assessment in modern mobile networks. Chapter 7 addresses the issue of quality of service (QoS) prediction in vehicle-to-everything (C-V2X) communication scenarios. Chapter 8 presents the practical closure of the intelligent management loop in mobile networks, moving from the monitoring and forecasting phases to the stage of real optimization and implementation.

The content of the individual chapters is well balanced and structured in sections that fully reflect the description of the proposed methods and algorithms or the analysis of the experimental studies conducted.

5. Contributions of the dissertation work

The contributions in the dissertation are related to the development of effective methods and algorithms for improving QoS and QoE, by integrating artificial intelligence. The achieved results are of a scientific-applied nature and can be summarized as follows:

- An approach for integrating ML models into Open RAN architecture has been developed. The conceptual and architectural prerequisites for using AI/ML in Open RAN have been outlined, including the positioning of the trained models within the RIC.
- Defining a user-centric approach to QoE and its relationship to QoS. Factors influencing QoE (human, system, contextual and content-related) are examined and correlation models that link QoS to QoE are analyzed.
- A conceptual framework for classifying anomalies in mobile networks has been developed, which takes into account the evolution from point to contextual and collective anomalies and the specificity of time series, high dimensionality and class imbalance.
- A transformer model for anomaly detection in the O-RAN test network architecture has been developed. The developed anomaly detection module is implemented as a microservice in the NWDAF analytics layer and demonstrates the ability to analyze traffic in near-real-time and notify about abnormal events.

I believe that these contributions correctly reflect what the author achieved in the process of the research conducted and will undoubtedly find their practical applicability.

6. Assessment of dissertation publications

14 publications have been made on the topic of the dissertation, of which 9 are in materials of international scientific conferences, 4 articles in scientific journals and 1 chapter of a book. In five of the publications the doctoral student is the first author. The publications reflect the essential moments of the dissertation.

7. Evaluation of the dissertation abstract

The presented abstract has been prepared in accordance with the requirements and sufficiently reflects the main content of the dissertation work and its contributing results.

8. Recommendations and critical remarks

The notes are of an editorial nature. Some of the figures are difficult to read. The content of the individual chapters could be shortened by removing unnecessary descriptive parts at the beginning. The contributions, as presented at the end of the work, could be reformulated, some of them being summarized or removed.

9. Conclusion

Based on the above, I believe that the dissertation meets the requirements of the Act on the Development of the Academic Staff in the Republic of Bulgaria and the Regulations for its implementation and has the necessary qualities to award its author, M.Eng. Atanas () Vlahov, the scientific and educational degree "Doctor".

17.06.2026
Sofia

Signature:

(Prof. Dr. Georgi Iliev)