

АНОТАЦІЯ

Банар А. Ю. Методи і технології використання алгоритмів штучного інтелекту в програмно-конфігурованих мережах в умовах обмежених ресурсів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 - Телекомунікації та радіотехніка. – Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, 2026.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню науково-практичного завдання покращення адаптивного керування доступом до обмежених ресурсів у програмно-конфігурованих мережах шляхом розроблення та експериментального обґрунтування методів і технологій застосування алгоритмів штучного інтелекту. Основну увагу зосереджено на інтеграції AI/ML-модулів у цикл керування SDN, коли деградація якості обслуговування спричинена не загальною нестачею пропускнуої здатності, а перевантаженням критичного прикладного ресурсу, зокрема API-сервісу, сервісу авторизації, шлюзу доступу до даних або іншого вузького місця сервісного рівня. Запропонований метод орієнтований на локалізацію керуючого впливу саме в точці дефіциту ресурсу, забезпечення рівномірного розподілу доступу між клієнтами та збереження стабільної роботи мережевої інфраструктури.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наведено положення наукової новизни, практичне значення одержаних результатів, дані про апробацію та публікації за темою дисертації.

У **першому розділі** здійснено огляд літературних джерел, присвячених архітектурним принципам побудови програмно-конфігурованих мереж, типам локалізації SDN-контролерів, особливостям південних та північних інтерфейсів, проблемам управління ресурсами в сучасних SDN-мережах, а також підходам до інтеграції алгоритмів штучного інтелекту в SDN. Проаналізовано переваги SDN, що полягають у відокремленні площини керування від площини даних, централізації логіки прийняття рішень і програмованості мережевих політик.

Показано, що поряд із цим виникають нові виклики, пов'язані з обмеженнями масштабованості контролера, затримками керування, накладними витратами на телеметрію та ризиками перевантаження контрольної площини. Окрему увагу приділено порівнянню локальних, хмарних та ієрархічних edge-cloud архітектур SDN-контролерів, а також ролі REST/OpenFlow/MQTT у побудові інтегрованих AI-SDN середовищ.

Другий розділ присвячено методам побудови інтелектуальних SDN-мереж. У ньому розглянуто метрики оцінювання ефективності та справедливості розподілу ШІ-інтегрованих SDN-систем, зокрема класифікаційні метрики для ML-моделей та метрики розподілу ресурсів. Обґрунтовано вибір моделей машинного навчання для задач керування доступом до обмеженого ресурсу з урахуванням компромісу між якістю рішень і обчислювальними витратами. Також, проаналізовано платформи і реалізації SDN-контролерів та критерії інтеграції алгоритмів штучного інтелекту в їхню керуючу логіку. Результати розділу формують теоретичну та методичну основу для подальшого експериментального дослідження AI-керування в ресурсно-обмежених SDN-сценаріях.

У **третьому розділі** наведено моделювання та дослідження запропонованого Cloud-AI-SDN фреймворку в умовах обмежених ресурсів. Розроблено трирівневу архітектуру фреймворку, яка поєднує керуваність мережі на рівні SDN-контролера, інтеграцію інтелектуальної аналітики в цикл прийняття рішень, а також засоби масштабованості, спостережуваності та аудиту керуючих впливів. Побудовано експериментальний стенд для відтворюваного дослідження доступу до обмеженого ресурсу в SDN із використанням AI-модуля, REST API та IoT-подій/телеметрії. Показано, що архітектура стенда реалізує взаємодію трьох основних типів інтерфейсів: північний (REST), південний (OpenFlow 1.3) та IoT-каналу подій (MQTT), формуючи наближену до практики модель гібридної AI-SDN-IoT екосистеми. У розділі також описано методику експериментального дослідження, етапи формування телеметричних даних, підготовку і навчання ШІ-модуля, а також процедури тестування та оцінювання результатів експерименту.

Четвертий розділ присвячено апаратним дослідженням та практичній реалізації запропонованого фреймворку. Проведено порівняльну оцінку моделей машинного навчання для ШІ-модуля SDN за показниками затримки прийняття рішень, справедливості розподілу обмежених ресурсів та загальної якості класифікації. На основі апаратної валідації в умовах обмежених ресурсів edge-пристрою показано, що модель Gradient Boosting забезпечує вищу якість прийняття рішень порівняно з Logistic Regression, зберігаючи при цьому прийнятні накладні витрати за CPU, RSS та енергоспоживанням. Зокрема, встановлено, що GB досягає accuracy ≈ 0.9988 та F1 ≈ 0.988 , тоді як LR має accuracy ≈ 0.9768 та macro-F1 ≈ 0.843 , при цьому різниця в енергоспоживанні між моделями є незначною. У розділі також реалізовано та описано прикладний веб-сервіс Cloud-AI-SDN фреймворку, який включає REST API, Web UI, засоби керування IoT-площиною експерименту, візуалізацію експериментальних даних і моніторинг системних метрик на базі Prometheus/Grafana. Це забезпечує відтворюваність сценаріїв, зручність керування експериментом і можливість аналізу стану системи під час роботи фреймворку. Отримані результати підтвердили ефективність запропонованих методів для покращення адаптивного керування доступом до обмежених ресурсів у програмно-конфігурованих мережах.

Наукова новизна результатів, отриманих у дисертаційній роботі, полягає у тому, що:

- *Вперше* запропоновано метод адаптивного керування доступом до обмеженого ресурсу прикладного рівня в програмно-конфігурованій мережі, який, на відміну від методів, що базуються на коригуванні загальних характеристик мережі (пропускної здатності, глобальних QoS-параметрів, пріоритизації трафіку в мережі загалом), передбачає локалізацію керуючого впливу безпосередньо в точці фактичного дефіциту ресурсу. Це дозволило підвищити середній показник рівномірності розподілу доступу до обмеженого ресурсу з 79,2% до 90,98% без необхідності коригування зазначених загальних характеристик мережі.

- **Удосконалено** механізм інтелектуального керування доступом до обмеженого ресурсу в SDN шляхом введення спеціалізованого AI-агента, який на відміну від підходів, що базуються на статичних правилах або враховують лише поточні мережеві параметри, формує керуюче рішення з урахуванням телеметричних ознак та параметрів, релевантних для конкретного типу обмеженого ресурсу, зокрема історії навантаження, часових характеристик звернень, частки клієнта в загальному навантаженні, факту попереднього блокування та кількості активних клієнтів. Це дало змогу локалізувати точку впливу в розподілені ресурси мережі, забезпечити адресний і адаптивний розподіл доступу до обмеженого ресурсу зі збереженням стабільного доступу до інших сервісів мережевої інфраструктури.

- **Набув подальшого розвитку** метод вибору моделі машинного навчання для інтелектуального керування в SDN в умовах обмежених ресурсів, який на відміну від підходів, що орієнтуються лише на загальну точність класифікації ML-моделі, передбачає оцінювання моделей за розширеними критеріями: класифікаційні показниками, стійкість до хибнопозитивних спрацювань, час прийняття рішення, завантаження CPU та RAM, енергоспоживання. Це дало змогу визначити Gradient Boosting (GB) як модель із максимальною точністю керування (Accuracy 0,9988 проти 0,9768 у Logistic Regression (LR); Precision 1,0 проти 0,54), а модель LR для сценаріїв, де важливішими є менші обчислювальні витрати, зокрема менший час прийняття рішення на 14,66%, нижче завантаження CPU на 13,4% та менше використання RAM на 6,33% порівняно з GB, за незначної різниці в енергоспоживанні між ними – 1,2%.

Удосконалено архітектуру інтелектуальної SDN-мережі для роботи в умовах обмежених ресурсів, яка, на відміну від рішень із окремим керуванням мережевими, прикладними та IoT-компонентами, забезпечує їх інтеграцію в єдиному контурі керування з включенням AI-підсистеми в цикл прийняття рішень. Особливістю архітектури є врахування типових обмежень централізованої SDN-архітектури, зокрема ризику компрометації контролера, стійкості до відновлення після збоїв, недостатньої прозорості змін політик та

складності інтеграції гетерогенних вузлів, шляхом поєднання засобів аудиту, автентифікації, резервного копіювання керуючих подій і змін політик, підтримки подієвої взаємодії та можливості адаптивного вибору й зміни ML-моделей залежно від ресурсних обмежень і вимог мережевого сценарію. Це дало змогу забезпечити централізоване та гнучке керування мережевою, прикладною та IoT-складовими системи, також забезпечити відтворюваність експериментальних сценаріїв і адаптацію режимів роботи до різних умов середовища розгортання та вимог до якості надання послуг.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що розроблені методи, програмно-апаратні компоненти та експериментально підтверджена архітектура можуть бути використані для підвищення ефективності функціонування SDN-орієнтованих інфраструктур у випадках наявності обмежених сервісних або прикладних ресурсів. Запропоновані рішення можуть бути впроваджені для адаптивного керування доступом до API, сервісів авторизації, систем зберігання даних, IoT-шлюзів та інших вузлів, критичних до перевантаження. Практична цінність результатів підтверджується апаратною апробацією запропонованої архітектури, реалізацією прикладного веб-сервісу керування і моніторингу, їх перевіркою в умовах реального ресурсного обмеження, а також впровадженням окремих результатів дисертаційної роботи в діяльність «Yukon Software Ltd» і ТОВ «ШАРПМАЙНДЗ ЮЕЙ», що підтверджено відповідними актами впровадження.

Ключові слова: зв'язок, інтернет речей, алгоритми, трафік, телекомунікаційна мережа, реалізація програмного забезпечення, машинне навчання, штучний інтелект (ШІ), виявлення, ефективність, оптимізація, програмно-конфігурована мережа, передача, методи.

ABSTRACT

Banar A. Methods and technologies for using artificial intelligence algorithms in software-defined networks under resource constraints – Qualifying scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 172 - Telecommunications and Radio Engineering. - Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, 2026.

The dissertation is devoted to addressing the scientific and practical task of improving adaptive access control to limited resources in software-defined networks by developing and experimentally substantiating methods and technologies for applying artificial intelligence algorithms. The main focus is placed on the integration of AI/ML modules into the SDN control loop when the degradation of service quality is caused not by a general shortage of bandwidth, but by the overload of a critical application resource, in particular, an API service, an authorization service, a data access gateway, or another bottleneck at the service level. The proposed approach aims to localize the control impact precisely at the point of resource shortage, ensure a fair distribution of access among clients, and maintain stable operation of the network infrastructure.

The **introduction** substantiates the relevance of the dissertation topic, formulates the aim and objectives of the research, defines the object, subject, and research methods, presents the scientific novelty, the practical significance of the obtained results, and provides information on approbation and publications related to the dissertation topic.

The **first section** reviews the literature on the architectural principles of software-defined networks, types of SDN controller placement, features of southbound and northbound interfaces, resource management problems in modern SDN networks, and approaches to integrating artificial intelligence algorithms into SDN. The advantages of SDN are analyzed, namely the separation of the control plane from the data plane, the centralization of decision-making logic, and the programmability of network policies. It is shown that, along with these advantages, new challenges arise, related to controller scalability limitations, control delays, telemetry overhead, and risks of overloading the control plane. Particular attention is paid to the comparison of local, cloud, and hierarchical edge-cloud architectures of SDN controllers, as well as to the role of REST/OpenFlow/MQTT in building integrated AI-SDN environments.

The **second section** is devoted to methods for building intelligent SDN networks. It considers metrics for evaluating the efficiency and fairness of AI-integrated SDN systems, in particular, classification metrics for ML models and resource allocation metrics. The choice of machine learning models for access control tasks under limited-resource constraints is substantiated by the trade-off between decision quality and computational cost. SDN controller platforms and implementations, as well as criteria for integrating artificial intelligence algorithms into their control logic, are also analyzed. The results of the chapter form the theoretical and methodological basis for further experimental research on AI-based control in resource-constrained SDN scenarios.

The **third section** presents the modeling and investigation of the proposed Cloud-AI-SDN framework under resource-constrained conditions. A three-level framework architecture has been developed, combining network controllability at the SDN controller level, the integration of intelligent analytics into the decision-making cycle, and mechanisms for scalability, observability, and control-impact auditing. An experimental testbed was built for reproducible investigation of access to a limited resource in SDN using an AI module, REST API, and IoT events/telemetry. It is shown that the testbed's architecture implements the interaction among three main interface types: Southbound (OpenFlow 1.3), Northbound (REST), and the IoT event channel (MQTT), thereby forming a practice-oriented model of a hybrid AI-SDN-IoT ecosystem. The chapter also describes the experimental methodology, the stages of telemetry data generation, the preparation and training of the AI module, and the procedures for testing and evaluating the experimental results.

The **fourth section** is devoted to hardware-based research and the practical implementation of the proposed framework. A comparative evaluation of machine learning models for the SDN AI module was conducted based on decision-making latency, fairness in limited-resource allocation, and overall classification quality. Based on hardware validation under constrained resources of an edge device, it is shown that the Gradient Boosting model achieves higher decision quality than Logistic Regression while maintaining acceptable overhead in CPU, RSS, and energy consumption. It was

established that GB achieves an accuracy \approx of 0.9988 and an F1 \approx of 0.988, whereas LR has an accuracy \approx of 0.9768 and a macro-F1 \approx of 0.843. The difference in energy consumption between the models is insignificant. The chapter also implements and describes an application-level web service within the Cloud-AI-SDN framework, which includes a REST API, a Web UI, tools for controlling the IoT plane of the experiment, experimental data visualization, and monitoring of system metrics using Prometheus/Grafana. This ensures the reproducibility of scenarios, the convenience of experiment management, and the ability to analyze the system state during framework operation. The obtained results confirmed the effectiveness of the proposed methods for improving adaptive access control to limited resources in software-defined networks.

The **scientific novelty** of the results obtained in the dissertation lies in the following:

- *For the first time*, a method for adaptive control of access to a limited application-layer resource in a software-defined network has been proposed. Unlike methods that adjust general network characteristics, such as bandwidth, global quality of service parameters, or overall traffic prioritization, the proposed method localizes the control action directly at the point of resource shortage. This made it possible to increase the average fairness of access distribution to the limited resource from 79.2% to 90.98% without adjusting the general network characteristics.

- The mechanism of intelligent access control to a limited resource in SDN *has been improved* by introducing a specialized AI agent which, unlike approaches based on static rules or considering only current network parameters, forms control decisions taking into account telemetry features and parameters relevant to a specific type of limited resource, in particular load history, temporal characteristics of requests, the client's share in the total load, the fact of previous blocking, and the number of active clients. This made it possible to localize the point of control action within distributed network resources, ensure targeted and adaptive allocation of access to the limited resource, and maintain stable access to other network infrastructure services.

- The method for selecting a machine learning model for intelligent control in SDN under resource constraints has been *further developed*. Unlike approaches that focus only on the overall classification accuracy of an ML model, the proposed method evaluates models using extended criteria, including classification metrics, robustness to false-positive decisions, decision-making time, CPU and RAM utilization, and energy consumption. This made it possible to identify Gradient Boosting (GB) as the model with the highest control accuracy (Accuracy 0.9988 versus 0.9768 for Logistic Regression (LR); Precision 1.0 versus 0.54), while LR was identified as preferable for scenarios where lower computational cost is more important, particularly due to its 14.66% shorter decision-making time, 13.4% lower CPU utilization, and 6.33% lower RAM usage compared to GB, with only a minor difference in energy consumption between them of 1.2%..

- The architecture of an intelligent SDN network for operation under resource-constrained conditions *has been improved*. Unlike solutions that separate control of network, application, and IoT components, the proposed architecture integrates them into a unified control loop, including an AI subsystem in the decision-making cycle. A distinctive feature of the architecture is that it accounts for typical limitations of centralized SDN architectures, in particular, the risk of controller compromise, resilience in post-failure recovery, insufficient transparency of policy changes, and the complexity of integrating heterogeneous nodes. This is achieved by combining audit mechanisms, authentication, backup of control events and policy changes, support for event-driven interaction, and the ability to adaptively select and replace ML models based on resource constraints and the requirements of a specific network scenario. This made it possible to ensure centralized, flexible management of the system's network, application, and IoT components, as well as the reproducibility of experimental scenarios and the adaptation of operating modes to different deployment environments and service quality requirements.

The *practical significance* of the results is that the developed methods, hardware-software components, and experimentally validated architecture can be used to improve the efficiency of SDN-oriented infrastructures when service or application

resources are limited. The proposed solutions can be implemented for adaptive access control across APIs, authorization services, data storage systems, IoT gateways, and other nodes critical to overload protection. The practical value of the results is confirmed by the hardware validation of the proposed architecture, the implementation of an application-level web service for control and monitoring, its verification under real resource-constrained conditions, as well as by the implementation of selected dissertation results in the activities of “Yukon Software Ltd” and “SHARPMINDS UA LLC”, as confirmed by the relevant implementation acts.

Keywords: connection, internet of things (IoT), algorithm, traffic, telecommunication network, software system implementation, machine learning, artificial intelligence (AI), detection, efficiency, optimization, software-defined network (SDN), transmitting, methods.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Наукові праці у виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України та проіндексованих у наукометричній базі даних Scopus:

1. **Banar A., Vorobets H.** AI-based adaptive management of limited resources in SDN-IoT ecosystems. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2025. Vol. 2025. № 4. P. 154-170. DOI: 10.32620/reks.2025.4.11 (Scopus, Q3, <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101038702&tip=sid&clean=0>). (Внески авторів: **Банар А.Ю.** - огляд літератури, розробка методу управління SDN-мережею на базі інтелектуальних агентів, побудова топології мережі та архітектури фреймворку, налаштування інтелектуального управління, програмна реалізація алгоритмів керування, підготовка тексту роботи. Воробець Г.І. - формулювання концепції інтелектуального управління мережею, визначення вимог до системи управління, наукове редагування тексту.)

Наукові праці у виданнях, що входять до переліку наукових фахових видань України:

2. **Банар А. Ю.**, Воробець Г. І. Перспективні напрями розвитку, удосконалення і застосувань мережі SDN на основі методів штучного інтелекту. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки.* 2025. Т. 355. № 4. С. 15-21. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-355-1 (Внески авторів: **Банар А.Ю.** - аналіз архітектурних особливостей SDN та викликів безпеки, систематизація методів штучного інтелекту для завдань балансування трафіку та забезпечення QoS/QoE, розробка класифікації загроз та методів їх протидії у програмно-конфігурованих мережах, підготовка тексту статті та візуалізацій. Воробець Г.І. - постановка завдання дослідження, визначення концепції інтеграції ШІ в SDN, аналіз огляду літератури та наукове редагування рукопису.)

3. **Банар А. Ю.**, Воробець Г. І. Алгоритми штучного інтелекту для оптимізації функціонування SDN: сучасні підходи та перспективи. *Зв'язок.* 2025. № 4. С. 11-18. DOI: 10.31673/2412-9070.2025.041241 (Внески авторів: **Банар А. Ю.** - дослідження та порівняльний аналіз ефективності алгоритмів машинного навчання для завдань SDN, розробка класифікації напрямів інтеграції ШІ (безпека, маршрутизація, енергоефективність), формування порівняльної таблиці ефективності методів, написання основного тексту. Воробець Г.І. - формування структури дослідження, перевірка результатів порівняльного аналізу, формулювання висновків щодо обмежень використання ШІ, науковий огляд рукопису перед друком.)

4. **Банар А. Ю.**, Воробець Г. І. Хмарні SDN-контролери з підтримкою ШІ: архітектура, масштабованість та безпека (порівняльне дослідження). *Безпека інфокомунікаційних систем та Інтернету речей.* 2025. Т. 3. № 1. С. 01011:1-6. DOI: 10.31861/sisiot2025.1.01011 (Внески авторів: **Банар А.Ю.** - дослідження архітектур локальних та хмарних SDN-контролерів (монолітна, мікросервісна, ієрархічна), аналіз проблем масштабованості та затримок у хмарному середовищі, аналіз сценаріїв інтеграції AI-модулів у хмарну інфраструктуру,

підготовка тексту та графічних матеріалів. Воробець Г.І. - концептуалізація порівняльного дослідження, визначення критеріїв оцінки архітектур, наукове редагування статті.)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. **Банар А. Ю.** Перспективні напрями оптимізації і захисту даних в SDN мережі з використанням штучного інтелекту. *Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки (ПІКТ - 2023):* праці XII Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Чернівці, 10 - 12 лист. 2023 р.). С. 91-92.

6. **Банар А. Ю., Воробець Г. І.** Особливості і переваги застосування штучного інтелекту у хмарній реалізації SDN контролера. *Physical and technological problems of transmission, processing and storage of information in infocommunication systems (PREDT - 2025):* Proceedings of Xth International Scientific-Practical Conference. (Чернівці, 15-17 травня 2025). С. 189-190. (Внески авторів: **Банар А.Ю.** - проведення порівняльного аналізу архітектур хмарних SDN-контролерів та оцінка їх масштабованості, дослідження аспектів інтеграції ШІ-модулів для керування трафіком, редагування тексту тез, розробка презентаційних матеріалів та очний виступ із доповіддю на конференції. Воробець Г.І. - постановка завдання дослідження, науковий огляд питань безпеки хмарних рішень, підготовка тексту тез, перевірка матеріалів доповіді.)

7. **Банар А. Ю., Воробець Г. І.** Open-source фреймворк для моделювання та оптимізації SDN-мереж із використанням алгоритмів штучного інтелекту. *Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки (ПІКТ - 2025):* праці XIV Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Чернівці, 13 - 15 лист. 2025 р.). С. 22-24. (Внески авторів: **Банар А.Ю.** - обґрунтування вибору open-source інструментів для реалізації SDN-фреймворку, програмна реалізація компонентів архітектури та проведення експериментального моделювання, написання тез, підготовка презентаційних матеріалів та очний виступ із пленарною доповіддю. Воробець

Г.І. - огляд використаного відкритого програмного забезпечення для досліджень в SDN, формулювання завдань роботи, перевірка матеріалів доповіді.)

8. **Банар А. Ю.**, Воробець Г. І. Побудова та управління SDN мереж з використанням методів штучного інтелекту. *Інтелектуальні інформаційні системи*: Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів. (м. Миколаїв, 4-5 груд. 2025 р.). С. 10-12. (Внески авторів: **Банар А.Ю.** - розробка архітектури та побудова експериментальної інтелектуальної SDN-платформи, реалізація алгоритмів для адаптивного розподілу ресурсів, підготовка тексту тез та виступ із доповіддю. Воробець Г.І. - формулювання концепції об'єднання SDN та ШІ для гетерогенних систем, визначення вимог до відтворюваності експериментів, перевірка матеріалів доповіді та підготовка до виступу.)