

## РЕЦЕНЗІЯ

доктора технічних наук, професора,  
професора кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки  
Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

Політанського Руслана Леонідовича

на дисертаційну роботу Банара Анатолія Юрійовича

*«Методи і технології використання алгоритмів штучного інтелекту в  
програмно-конфігурованих мережах в умовах обмежених ресурсів»*

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка,

галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації

### **Актуальність теми дисертаційного дослідження та зв'язок з науковими планами і програмами**

Спрямованість дисертаційної роботи відповідає сучасним тенденціям розвитку телекомунікаційних та інфокомунікаційних систем, у яких дедалі більшого значення набувають задачі інтелектуального управління гетерогенним трафіком та розподілу ресурсів у реальному часі. Для таких завдань традиційні підходи статичної маршрутизації та глобального обмеження пропускну здатності виявляються недостатньо ефективними, особливо коли «вузьким місцем» мережі виступає не канал зв'язку, а конкретний прикладний ресурс чи IoT-шлюз. Використання програмно-конфігурованих мереж (SDN) дозволяє централізувати логіку прийняття рішень, проте особливо актуальною стає проблема узгодження складних алгоритмів штучного інтелекту, що потребують значних обчислювальних ресурсів, із апаратною потужністю контролерів периферійного рівня, яка є обмеженою. Для телекомунікаційної інфраструктури важливими є не лише точність розпізнавання мережеских станів, а й стабільність циклу керування та дотримання рівномірного доступу між потоками користувачів.

У цьому контексті дисертаційна робота А. Ю. Банара, присвячена розробленню методів і технологій використання алгоритмів штучного інтелекту в SDN мережах із обмеженою потужністю периферійних ресурсів, є актуальною. У роботі порушено важливе науково-прикладне завдання покращення адаптивного керування доступом до обмежених ресурсів у SDN із забезпеченням заданого рівномірного розподілу між абонентами мережі, та дотриманням вимог стабільності роботи мережевої інфраструктури.

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до тематики наукових досліджень кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича в межах науково-дослідної роботи «Методи формування сигнальних конструкцій та інформаційні процеси програмно-апаратної взаємодії широкосмугових телекомунікаційних систем та Інтернету речей» (державний реєстраційний номер 121U112870, 2021-2025 рр.).

### **Структура та зміст дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів основного тексту, загальних висновків, списку використаних джерел, який налічує 118 найменувань, та додатків. Загальний обсяг роботи становить 159 сторінок. Основний зміст дисертації проілюстровано 57 рисунками та 5 таблицями. Структура роботи обумовлена і відтворює основні етапи наукового дослідження - від аналізу сучасного стану проблеми до отримання прикладних результатів та їх експериментальної перевірки із використанням апаратних ресурсів.

У *вступі* сформульовано мету, завдання, об'єкт, предмет та методи дослідження, обґрунтовано актуальність теми, визначено наукову новизну, практичне значення одержаних результатів, наведено зв'язок із науковими програмами, а також є публікації здобувача, що відображають її результати та є дані про апробацію.

*Перший* розділ є оглядово-аналітичним і присвячений аналізу сучасного стану досліджень архітектурних принципів програмно-конфігурованих мереж та інтеграції методів штучного інтелекту в контур керування. Окрему увагу

приділено проблемам управління ресурсами в сучасних SDN-мережах, викликам масштабування хмарних і локальних контролерів та накладними витратами у процесі роботи мережі. Аналіз підводить до постановки науково-прикладної задачі керування доступом до обмеженого прикладного ресурсу в умовах обмежень апаратних ресурсів.

У *другому* розділі сформовано методичну основу побудови ШІ-інтегрованих SDN-мереж. Розглянуто метрики оцінювання ефективності та рівномірності розподілу ШІ-інтегрованих систем, зокрема класифікаційні показники для ML-моделей та індекс справедливості Джейна. Обґрунтовано вибір моделей машинного навчання з урахуванням компромісу між якістю класифікації та обчислювальною складністю. Систематизовано вимоги до платформ SDN-контролерів та сценаріїв інтеграції AI-підсистем, що закладає теоретичний фундамент для подальшого моделювання.

*Третій* розділ присвячено розробці архітектури та моделюванню запропонованих рішень. Представлено трирівневу гібридну архітектуру, що поєднує централізоване керування на рівні SDN-контролера з інтелектуальною аналітикою та IoT-компонентами. Побудовано відтворюваний експериментальний стенд, який реалізує взаємодію площин SDN через інтерфейси OpenFlow, REST та MQTT. Деталізовано методику проведення дослідження, від генерації трафіку та підготовки телеметрії - до розгортання логіки ШІ-модуля як окремого сервісу, що забезпечує адаптивне керування квотами доступу на рівні правил потоків.

У *четвертому* розділі наведено результати апаратних досліджень та практичної реалізації запропонованої архітектури мережі. Проведено детальну порівняльну оцінку ML-моделей (Logistic Regression, Random Forest, Gradient Boosting, SVM, MLP) за критеріями точності, затримки прийняття рішень та впливу на обчислювальні ресурси. Важливим результатом є апаратна апробація ШІ-модуля на edge-пристрої (Raspberry Pi 5), що підтвердила придатність обраної ML-моделі (GB) для забезпечення оптимальної якості керування з мінімальним впливом на енергоспоживання (незначне підвищення

енергоспоживання становить близько 1.2% у порівнянні з найбільш енергоефективною ML-моделлю). Реалізовано прикладний веб-сервіс із REST API та засобами моніторингу для централізованого управління ходом експериментів.

*Висновки* містять підсумки результатів дослідження, що повністю відображають виконання поставлених у вступі завдань і підтверджують наукове та практичне значення розроблених методів.

### **Наукова новизна**

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розробленні та експериментальному обґрунтуванні методів і технологій інтелектуального керування доступом до обмежених ресурсів у програмно-конфігурованих мережах із використанням алгоритмів штучного інтелекту.

До найбільш вагомих результатів наукової новизни можна віднести:

1. **Вперше** запропоновано метод адаптивного керування доступом до обмеженого ресурсу прикладного рівня в програмно-конфігурованій мережі. На відміну від існуючих методів, які спираються на коригування глобальних параметрів мережі (пропускної здатності, загальних QoS-політик), новий метод локалізує керуючий вплив безпосередньо в точці виникнення дефіциту ресурсу. Це забезпечило зростання середнього показника рівномірності розподілу доступу (за індексом Джейна) з 79,2% до 90,98% без деградації показників для некритичних потоків.

2. **Удосконалено** механізм інтелектуального керування доступом у SDN шляхом введення спеціалізованого ШІ-агента. На відміну від підходів, що базуються на статичних правилах або оцінюють виключно поточні метрики пересилання, агент формує рішення на основі виділених телеметричних ознак. Це забезпечило адаптивний та адресний розподіл доступу із збереженням стабільності інших сервісів інфраструктури.

3. **Набув подальшого розвитку** метод вибору моделі машинного навчання для задач керування SDN-мережами із обмеженими обчислювальними

ресурсами. На відміну від підходів, що базуються лише на поділі моделей на класи (Accuracy, F1, Recall), запропонований підхід оцінює моделі за комплексом критеріїв: стійкістю до хибнопозитивних спрацювань, обчислювальною складністю, завантаженням апаратних ресурсів та енергоспоживанням.

**4. Удосконалено** архітектуру інтелектуальної SDN-мережі. Покращена архітектура забезпечує глибоку інтеграцію мережевих, прикладних та IoT-компонентів у єдиний контур керування. Врахування специфічних обмежень edge-архітектури досягається шляхом комбінації засобів аудиту керуючих команд (blockchain-механізми), подієвої взаємодії (MQTT) та адаптивного перемикання ML-моделей прийняття рішень в залежності від умов розгортання.

Зазначені результати є взаємно узгодженими, доповнюють один одного та розв'язують поставлену в дисертації науково-прикладну задачу.

### **Практична цінність роботи**

Цінність дисертаційної роботи полягає в тому, що запропоновані методи, архітектурні рішення та програмно-апаратні компоненти можуть бути використані для побудови SDN-орієнтованих інфраструктур, у яких необхідно забезпечити адаптивне керування доступом до обмежених сервісних або прикладних ресурсів.

**Практична цінність результатів** дисертаційного дослідження полягає в такому:

- Створено відтворюваний експериментальний фреймворк для дослідження адаптивного доступу до обмеженого ресурсу в SDN із можливістю генерації навантаження, моніторингу, збору телеметрії та оцінювання ефективності керуючих політик.

- Реалізовано AI-модуль для інтелектуального керування доступом, який дозволяє аналізувати поведінку клієнтів, виявляти ризик перевантаження ресурсу та формувати адаптивні рішення для квотування або обмеження доступу.

- Проведено апаратну перевірку запропонованого підходу в умовах обмежених ресурсів edge-пристрою з оцінюванням затримки прийняття рішень, обчислювальних витрат та енергоспоживання.

- Розроблено прикладний веб-сервіс із REST API та Web UI для керування експериментальним середовищем, візуалізації результатів і моніторингу системних метрик.

Важливим також є те, що отримані результати впроваджено в діяльність підприємств («Yukon Software Ltd», ТОВ «ШАРПМАЙНДЗ ЮЕЙ»), що підтверджено відповідними актами і доводить практичну доцільність запропонованих рішень.

### **Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій**

Основні наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи є достатньо обґрунтованими. Вони спираються на аналіз сучасного стану розвитку програмно-конфігурованих мереж, методів інтеграції алгоритмів штучного інтелекту в SDN, а також на результати моделювання, експериментальної перевірки та апаратної апробації запропонованих рішень.

Автор не обмежується суто алгоритмічним моделюванням, а тісно пов'язує інтеграцію методів штучного інтелекту з експериментальним дослідженням їх впливу на мережеву інфраструктуру.

Висновки до окремих розділів і загальні висновки дисертації узгоджуються зі змістом та є наслідком отриманих результатів. Достовірність положень підсилюється тим, що результати перевірено в умовах відтворюваного експериментального середовища та підтверджено апаратною реалізацією у середовищі із обмеженою потужністю периферійних ресурсів.

### **Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертаційного дослідження**

1. У роботі запропоновано використання blockchain-механізмів для аудиту, автентифікації та фіксації керуючих впливів у Cloud-AI-SDN

фреймворку. Проте було б доцільно додатково виконати моделювання або експериментальну перевірку цього компонента, оскільки він має хороший потенціал для розвитку запропонованої архітектури.

2. У третьому та четвертому розділах для аналізу динаміки навантаження та розподілу квот у часі задається часове вікно агрегації  $\Delta t = 60\text{с}$ . Варто пояснити, на основі яких критеріїв визначалася саме така тривалість вікна, і чи проводилося дослідження впливу зміни цього параметра (наприклад, порівняння з 10с або 300с) на точність прогнозування та накладні витрати ресурсів для забезпечення функцій телеметрії у площині керування SDN-мережі.

3. У роботі показано незначну різницю в енергоспоживанні між LR та GB, однак було б доцільно розглянути довші експериментальні запуски або сценарії з різною інтенсивністю навантаження, щоб перевірити, яка саме реалізація забезпечить кращий критерій надійності функціонування в умовах тривалої та автономної експлуатації edge-вузла.

4. Поряд із загальною високим науковим рівнем і логічною послідовністю викладу матеріалу дисертації, у тексті рукопису зустрічаються поодинокі орфографічні, пунктуаційні та граматичні помилки, а також дрібні друкарські описки, які не применшують наукову цінність роботи.

5. Описано використання MQTT брокера, як компонента експериментального стенда, однак було б корисно чіткіше показати його фізичне або логічне розміщення в архітектурі - чи він розгортається на edge-вузлі, у хмарному рівні, на окремому сервері або в межах SDN-контролера.

6. Експериментальні дослідження виконано для конкретної топології в емуляторі Mininet за допомогою Open vSwitch. Викликає інтерес питання наскільки розроблені методи є залежними до зміни топології мережі, та чи потребує ШІ-модуль повного перенавчання при динамічній зміні кількості комутаторів або лінків інфраструктурного рівня.

Наведені дискусійні положення не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи та не зменшують значущості отриманих наукових і практичних результатів.

## **Повнота викладу в опублікованих працях наукових положень, висновків та рекомендацій**

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 9 наукових працях, з яких: 1 стаття у виданні, включеному до переліку наукових фахових видань України та проіндексованому в наукометричній базі даних Scopus (Q3), 3 статті у наукових фахових виданнях України, 4 праці апробаційного характеру у матеріалах і тезах доповідей наукових конференцій.

Опубліковані матеріали комплексно відображають зміст дисертації та охоплюють питання архітектурної організації програмно-конфігурованих мереж, методів адаптивного керування SDN-інфраструктурою на базі інтелектуальних AI/ML-агентів, порівняльного аналізу ефективності алгоритмів машинного навчання, а також практичні аспекти апаратної реалізації відтворюваних SDN платформ для edge-середовищ та екосистем Інтернету речей. Повнота викладу матеріалу в публікаціях є достатньою, наукові положення, висновки та рекомендації розкриті вичерпно.

## **Відсутність академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації**

Під час ознайомлення з дисертаційною роботою та опублікованими працями здобувача ознак академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації не виявлено. Використані в роботі положення, результати та наукові підходи інших авторів супроводжуються відповідними посиланнями на джерела.

## **Загальний висновок**

Дисертаційна робота Банара Анатолія Юрійовича «Методи і технології використання алгоритмів штучного інтелекту в програмно-конфігурованих мережах в умовах обмежених ресурсів» є завершеним, самостійно виконаним науковим дослідженням, у якому розв'язано актуальне науково-прикладне завдання покращення адаптивного керування доступом до обмежених ресурсів у програмно-конфігурованих мережах за рахунок розроблення та експериментального обґрунтування методів і технологій застосування

алгоритмів штучного інтелекту з локалізацією керуючого впливу безпосередньо в точці фактичного дефіциту ресурсу прикладного рівня.

За змістом, актуальністю, рівнем наукової новизни, практичною значущістю та обґрунтованістю висновків дисертація повністю відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою КМУ № 44 від 12.01.2022 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023 р., № 507 від 03.05.2024 р.), а також «Вимогам до оформлення дисертації», затвердженим Наказом Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 року (зі змінами згідно з Наказом МОН № 759 від 31.05.2019 року). Автор роботи, Банар Анатолій Юрійович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» з галузі знань 17 - «Електроніка та телекомунікації».

Рецензент,

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки

Чернівецького національного університету

імені Юрія Федьковича

« 08 » 06 2026 року



Руслан ПОЛІТАНСЬКИЙ

Підпис Політанського Р. засвідчую  
Учений секретар Чернівецького національного  
університету імені Юрія Федьковича  
Дирдовська Н. С.  
" 06 " 2026

