

РЕЦЕНЗІЯ

доктора технічних наук, професора,
професора кафедри комп'ютерних наук

Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

Урина Дмитра Ілліча

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 дисертаційного дослідження

Актуальність дисертаційного дослідження зумовлена переходом телекомунікаційних інфраструктур до програмованих, сервісно-орієнтованих і динамічних середовищ, у яких навантаження формується не лише традиційним мережевим трафіком, а й хмарними сервісами, IoT-пристроями, прикладними API та периферійними обчислювальними вузлами. У таких умовах ефективність мережі визначається не тільки пропускнуою здатністю каналів, а й здатністю системи своєчасно реагувати на перевантаження окремих критичних ресурсів, забезпечуючи стабільність сервісу та рівномірний доступ користувачів.

Програмно-конфігуровані мережі створюють сприятливі передумови для централізованого керування, однак їх практичне застосування в умовах обмежених ресурсів потребує нових підходів до прийняття керуючих рішень. Особливої ваги набуває інтеграція алгоритмів штучного інтелекту, здатних опрацьовувати телеметричні дані, враховувати поведінку клієнтів і формувати адаптивні політики доступу без надмірного навантаження на SDN-контролер та інші елементи інфраструктури.

У цьому контексті дисертаційна робота Банара А. Ю., присвячена розробленню методів і технологій використання алгоритмів штучного інтелекту

в програмно-конфігурованих мережах в умовах обмежених ресурсів, є актуальною та своєчасною. Запропоновані в роботі підходи орієнтовані на підвищення адаптивності керування, адресне регулювання доступу до дефіцитного ресурсу та підтримання стабільної роботи мережевої інфраструктури, що відповідає сучасним вимогам розвитку телекомунікаційних систем.

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами

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.).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, сформульованих у дисертації

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертаційній роботі Банара А. Ю., є обґрунтованими та логічно впливають із поставленої мети і завдань дослідження. У роботі використано загальноприйняті методи аналізу наукових джерел, імітаційного моделювання, математичної статистики, машинного навчання, експериментального дослідження, програмної інженерії та інструментального вимірювання.

Обґрунтованість отриманих результатів підтверджується розробленням експериментального стенда, реалізацією Cloud-AI-SDN фреймворку, порівняльним аналізом моделей машинного навчання, апаратною апробацією в умовах обмежених ресурсів, а також оцінюванням показників точності, затримки прийняття рішень, справедливості розподілу доступу, завантаження обчислювальних ресурсів та витратами енергії. Виклад матеріалу є послідовним,

результати подано аргументовано, а висновки відповідають змісту проведених досліджень.

Матеріали дисертаційного дослідження Банара А. Ю. відображено у 9 наукових публікаціях, які пройшли належне рецензування. Автором опубліковано 1 статтю у вітчизняному фаховому виданні, проіндексованому в базі даних Scopus (Q3), а також 3 статті у наукових фахових журналах України. Широка географія апробації результатів на міжнародному та національному рівнях підтверджується 4 працями у збірниках тез та матеріалах профільних конференцій.

Структура дисертації

Дисертаційна робота Банара А. Ю. має логічно побудовану структуру, що відповідає меті, завданням і послідовності проведеного дослідження. Робота складається з анотації, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 159 сторінок, робота містить 57 рисунків, список використаних джерел охоплює 118 найменувань.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення результатів.

У *першому* розділі проведено глибокий аналіз літературних джерел у галузі програмно-конфігурованих мереж, архітектури SDN-контролерів, інтерфейсів NBI/SBI, а також обґрунтовано виклики інтеграції ІІІ та протоколу MQTT в ресурсно-обмежені мережеві середовища.

Другий розділ присвячено обґрунтуванню метрик оцінювання ефективності ML-алгоритмів та рівномірності розподілу ресурсів, вибору моделей машинного навчання та системному аналізу критеріїв інтеграції ІІІ-модулів у керуючу логіку SDN.

У *третьому* розділі представлено моделювання та дослідження запропонованого тривірневого Cloud-AI-SDN фреймворку. Описано структуру

експериментального стенда (Ryu + Mininet + Open vSwitch) та методику формування телеметрії для навчання інтелектуального модуля.

У четвертому розділі висвітлено результати порівняльної оцінки ML-моделей за затримкою прийняття рішень та точністю детекції, наведено дані апаратної апробації ШІ-агента (Gradient Boosting та Logistic Regression) на фізичній платформі Raspberry Pi 5 з аналізом обчислювальних ресурсів та енергоспоживання, а також описано архітектуру розробленого прикладного веб-сервісу з REST API та Web UI.

У загальних *висновках* узагальнено та підсумовано основні науково-практичні результати роботи, які повністю корелюють із поставленими завданнями. Додатки містять акти про впровадження результатів у виробничу та навчальну діяльність.

Зміст дисертаційної роботи, обсяг та оформлення повністю відповідають нормативним вимогам МОН України, що висуваються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 - Телекомунікації та радіотехніка.

Наукова новизна

Наукова новизна дисертаційної роботи Банара А. Ю. полягає у розвитку архітектури інтелектуальних програмно-конфігурованих мереж, здатних адаптивно керувати доступом до дефіцитних прикладних ресурсів з урахуванням обмежень середовища розгортання.

Результатами, що визначають наукову новизну роботи, є:

- *Вперше* розроблено метод адаптивного регулювання доступу до обмеженого прикладного ресурсу в SDN-середовищі, у якому керуюча дія переноситься з рівня загальномережевого налаштування на рівень конкретного перевантаженого сервісу. Такий підхід дав змогу уникнути необґрунтованого впливу на всю мережу та підвищити середній показник рівномірності розподілу доступу з 79,2% до 90,98%.

- *Удосконалено* підхід до формування керуючих рішень в інтелектуальній SDN-мережі шляхом використання спеціалізованого AI-агента, який аналізує не лише поточні параметри трафіку, а й поведінкові та історичні характеристики споживання ресурсу окремими клієнтами. Це забезпечило більш адресне застосування політик доступу та зменшило ризик погіршення роботи сервісів, що не є джерелом перевантаження.

- *Набула подальшого розвитку* методика вибору моделей машинного навчання для інтелектуального керування SDN у ресурсо-обмежених умовах, де модель розглядається не тільки як класифікатор, а як елемент керуючого контуру з власною обчислювальною вартістю. Запропоновано враховувати комплекс показників, зокрема якість класифікації, час прийняття рішення, частоту хибнопозитивних спрацювань, обчислювальні витрати та енергоспоживання.

- *Удосконалено* архітектуру інтелектуальної SDN-мережі для роботи в умовах обмежених ресурсів, у якій мережевий, прикладний та IoT-рівні поєднано в єдиний керований контур із підтримкою AI-модуля керування, моніторингу, подієвого обміну та адаптивної зміни моделей машинного навчання. Також у запропонованій архітектурі враховано типові обмеження SDN, зокрема ризику компрометації контролера, стійкості до відновлення після збоїв, недостатньої прозорості змін політик та складності інтеграції гетерогенних вузлів. Це створило основу для відтворюваного експериментального дослідження, гнучкого керування компонентами системи та адаптації її роботи до різних сценаріїв ресурсних обмежень.

Практичне значення одержаних результатів

Практична цінність результатів дослідження полягає у створенні та експериментальному підтвердженні дієвого програмно-апаратного комплексу для попереднього захисту SDN-мереж від локальних перевантажень сервісного рівня. Важливе прикладне значення мають результати апаратної апробації ШІ-агента на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 5 (архітектура ARM). Розроблені рішення можуть бути застосовані для адаптивного керування

доступом до API-сервісів, сервісів авторизації, систем зберігання даних, IoT-шлюзів та інших вузлів, критичних до перевантаження.

Окремі результати дисертаційного дослідження впроваджено в діяльність «Yukon Software Ltd», ТОВ «ШАРПМАЙНДЗ ЮЕЙ» та в освітній процес Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, що підтверджено відповідними актами впровадження.

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертаційного дослідження

1. Окремі положення дисертації мають значний потенціал для подальшого розвитку, зокрема blockchain-аудит керуючих дій, адаптивний вибір ML-моделі, edge/fog-розгортання та керування IoT-сегментом. Було б доцільно в підсумкових висновках або перспективах подальших досліджень чіткіше виокремити ці напрями як основу для майбутнього розширення запропонованого Cloud-AI-SDN фреймворку.

2. Автор обґрунтовано використовує індекс розподілу Джейна для оцінювання рівномірності доступу до обмеженого ресурсу. Разом з тим, доцільно було б доповнити аналіз іншими метриками справедливості або стабільності, наприклад розглянутий в роботі max-min fairness, чи середньоквадратичне відхилення між клієнтами або часткою клієнтів, які систематично недоотримують доступ до ресурсу.

3. При описі хмарного прикладного рівня згадується можливість використання блокчейну як контуру автентифікації та перевірки команд керування до брокера MQTT. Варто деталізувати архітектурну сумісність, як саме легковагові IoT-вузли з обмеженими обчислювальними можливостями здатні взаємодіяти з блокчейн-контуром без критичного зростання енергоспоживання

4. У роботі проведено порівняння моделей Logistic Regression та Gradient Boosting за точністю, F1, накладними витратами (CPU, RSS, енергоспоживання). Водночас було б корисно детальніше показати, як саме змінюється якість роботи

моделей при зміні характеру навантаження - рівномірне, сплескове, сезонне, випадкове.

5. За результатами порівняння моделей (таблиця 4.1), модель MLP показала високу точність (0.9821), але відзначена схильністю до хибнопозитивних спрацювань, що загрожує необґрунтованим обмеженням легітимних користувачів. Було б доцільно уточнити, чи розглядалися методи калібрування порогу класифікації або модифікації функції втрат для MLP з метою мінімізації помилок типу False Positive.

Зазначені зауваження та дискусійні положення мають характер уточнень та рекомендацій для подальшого розвитку теми, жодним чином не применшують наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів і не впливають на загальну високу позитивну оцінку дисертаційної роботи Банара А. Ю., яка відповідає вимогам до кваліфікаційних наукових праць на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 172.

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 отримано нові науково обґрунтовані результати, що мають теоретичне та практичне значення для розвитку інтелектуальних програмно-конфігурованих телекомунікаційних мереж.

За актуальністю, науковою новизною, ступенем обґрунтованості положень, достовірністю отриманих результатів та їх практичним значенням дисертаційна робота відповідає вимогам пунктів 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету Міністрів України № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024).

Вважаю, що Банар Анатолій Юрійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 - Телекомунікації та радіотехніка, у галузі знань 17 - Електроніка та телекомунікації.

Рецензент,
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри комп'ютерних наук
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича

«12» червня 2026 року



Дмитро УГРИН

