

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора,
професора кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем
Хмельницького національного університету
Савенка Олега Станіславовича
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

Перехід телекомунікаційних мереж до сервісно-орієнтованих, хмарних та IoT-інтегрованих архітектур змінює характер задач керування. Дедалі частіше критичним стає не лише передавання трафіку, а й забезпечення стабільного доступу до прикладних ресурсів, які мають обмежену продуктивність або обмежені квоти використання. У таких умовах перевантаження окремого API-сервісу, шлюзу доступу, сервісу авторизації чи IoT-компонента може погіршувати якість функціонування всієї інфраструктури навіть за відсутності дефіциту пропускну здатності каналів зв'язку.

Програмно-конфігуровані мережі створюють передумови для централізованого й гнучкого керування такими процесами, однак саме по собі застосування SDN не усуває проблему своєчасного прийняття рішень. Тому особливої актуальності набуває інтеграція алгоритмів штучного інтелекту, які дають змогу перейти від статичних політик до адаптивного керування доступом на основі аналізу поточного стану системи та історії споживання ресурсу.

Саме цим питанням присвячена дисертаційна робота Банара А. Ю. Її актуальність визначається спрямованістю на розв'язання важливої науково-прикладної задачі - покращення адаптивного керування доступом до обмежених ресурсів у SDN із забезпеченням рівномірного розподілу доступу, стабільності роботи мережевої інфраструктури та можливості застосування запропонованих рішень до використання в ресурсо-обмежених мережевих середовищах.

Аналіз змісту дисертації та основні результати роботи

Дисертаційна робота складається з анотації, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів із висновками до кожного з них, загальних висновків, списку використаних джерел (118 найменувань) та додатків. Загальний обсяг роботи становить 159 сторінок, текст дисертації містить 57 рисунків.

У вступі автором описано тематику роботи, обґрунтовано її актуальність у контексті розвитку телекомунікаційних систем, розкрито мету, завдання, об'єкт та предмет дослідження. Сформульовано наукову новизну та практичне значення

одержаних результатів, а також наведено інформацію щодо їх апробації та впровадження.

У *першому* розділі розглянуто архітектурні принципи програмно-конфігурованих мереж, особливості локальних, хмарних та ієрархічних SDN-контролерів, а також північні й південні інтерфейси SDN. Окрему увагу приділено проблемам управління ресурсами, обмеженням контролера, накладним витратам та можливостям інтеграції алгоритмів штучного інтелекту в контур керування мережею.

Другий розділ присвячено методологічному обґрунтуванню побудови інтелектуальних SDN-мереж. Автором проаналізовано метрики оцінювання ефективності ML-моделей у поєднанні з метриками справедливості розподілу мережевих ресурсів. Здійснено відбір моделей машинного навчання з урахуванням компромісу між точністю класифікації та обчислювальною вартістю інференсу. Також проаналізовано сучасні платформи SDN-контролерів, що дозволило науково обґрунтувати вибір подійно-орієнтованої архітектури Ryu для реалізації експериментального керуючого контуру.

У *третьому* розділі розроблено архітектуру трирівневого Cloud-AI-SDN фреймворку, який забезпечує інтеграцію мережевих, прикладних та IoT-компонентів у єдиний цикл керування. Описано структуру розробленого експериментального стенда. Розроблено методику проведення експериментальних досліджень, від генерації гетерогенного трафіку та механізмів збору телеметрії до підготовки, навчання та розгортання ШІ-модуля.

Четвертий розділ містить результати апаратної апробації та практичної реалізації запропонованих технологічних рішень. Проведено порівняльне тестування обраних ML-моделей на фізичному периферійному пристрої (Raspberry Pi 5, ARM архітектура). Також реалізовано прикладний веб-сервіс Cloud-AI-SDN фреймворку з REST API, Web UI, засобами керування IoT-площиною експерименту та візуалізацією даних на базі Prometheus/Grafana.

У загальних *висновках* підведено підсумки дослідження, що повністю відповідають поставленим завданням, підтверджують наукову новизну та розкривають практичну цінність роботи.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування алгоритмів штучного інтелекту для підвищення адаптивності, рівномірності та стабільності керування доступом у програмно-конфігурованих мережах.

Наукова новизна, оцінка обґрунтованості наукових положень дисертаційного дослідження та їх достовірності

У дисертаційній роботі Банара А. Ю. отримано наукові результати, що розширюють підходи до побудови інтелектуальних SDN-систем, орієнтованих на інтелектуальне керування доступом до обмежених сервісних ресурсів у телекомунікаційній інфраструктурі.

1. 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.

2. 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.

3. 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 показники, 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%.

4. 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.

Дисертаційна робота Банара А. Ю. має чітку логічну структуру та є завершеним, цілісним науковим дослідженням. Достовірність і високий ступінь

обґрунтованості отриманих результатів забезпечуються коректним застосуванням математичної статистики, машинного навчання, імітаційного моделювання, програмної інженерії та інструментального вимірювання.

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

Дисертаційне дослідження Банара А. Ю. виконано згідно з планом 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.).

Теоретичне та практичне значення результатів

Теоретичне значення результатів дисертаційної роботи полягає у розвитку науково-методичних підходів до інтеграції алгоритмів штучного інтелекту в контур керування програмно-конфігурованими мережами для покращення адаптивного керування доступом до обмежених ресурсів. Розроблена трирівнева архітектура Cloud-AI-SDN фреймворку створює підґрунтя для подальших наукових досліджень у сфері розподіленого керування ресурсами мереж із обмеженими обчислювальними можливостями, де ключовим є дотримання балансу між точністю рішень та апаратним бюджетом пристроїв.

Результати дисертаційної роботи пройшли практичну апробацію та впроваджені у діяльність компаній «Yukon Software Ltd» та ТОВ

«ШАРПМАЙНДЗ ЮЕЙ», що підтверджено відповідними актами впровадження.

Публікація та апробація результатів дисертаційної роботи

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

Основні результати, отримані в дисертаційній роботі, були предметом обговорень на науковому семінарі кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича (м. Чернівці, 13 березня 2026), міжнародному науково-технічному семінарі «Критичні комп'ютерні технології та системи (КриКТехС)» (м. Харків, 29 січня 2026), п'ятнадцятій міжнародній конференції «Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2025)» (Греція, Афіни, 19-21 грудня 2025), всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Інтелектуальні інформаційні системи» (м. Миколаїв, 4-5 грудня 2025), чотирнадцятій міжнародній конференції «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки (ПІКТ-2025)» (м. Чернівці, 13-15 листопада 2025), десятій

міжнародній науково-практичній конференції «Physical and technological problems of transmission, processing and storage of information in infocommunication systems (PREDT - 2025)» (м. Чернівці, 15 травня 2025), дванадцятій міжнародній конференції «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки (ПІКТ-2023)» (м. Чернівці, 10 - 12 листопада 2023).

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертаційного дослідження

1. У пункті 3.4.2 наведено вектор ознак $x_i(t)$ для навчання ШІ-модуля інтелектуального керування. Варто було б детальніше обґрунтувати вибір саме цього набору з шести телеметричних ознак, а також деталізувати обґрунтування щодо виключення інших мережевих метрик (наприклад, варіацію затримок пакета або джиттер).

2. Апаратна апробація на базі Raspberry Pi 5 оцінювала додаткові витрати моделей LR та GB за завантаженням CPU та RAM. Проте експерименти проводилися при обмеженій кількості емульованих клієнтів (хости h1-h7). Було б доцільно оцінити як поводитиметься обчислювальна затримка прийняття рішення моделей за умови лінійного зростання кількості клієнтів у мережі на порядки.

3. У четвертому розділі модель Gradient Boosting визначена як оптимальна за точністю (Ассурасу = 0,9988). Проте алгоритми машинного навчання даного типу мають високу схильність до перенавчання. Тому варто детальніше описати процедуру підбору гіперпараметрів моделі, зокрема кількості дерев, глибини дерев та темпу навчання.

4. У дисертації розглядаються питання безпеки централізованого контролера SDN від DDoS-атак, але недостатньо деталізовано подано аспекти захисту самого ШІ-модуля від несанкціонованого маніпулювання даними. Зокрема, важливою є стійкість запропонованого методу до навмисних атак на моделі машинного навчання з боку компрометованих клієнтів, які можуть намагатися штучно обійти обмеження квот.

5. Було б доцільно ширше розглянути питання інтерпретованості рішень AI-агента. Зокрема, для практичного впровадження важливо не лише заблокувати або обмежити клієнта, а й пояснити адміністратору, які саме ознаки стали підставою для такого рішення.

Водночас наведені дискусійні положення та зауваження не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи, не применшують її наукової новизни, практичної цінності та достовірності отриманих результатів.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Банара Анатолія Юрійовича на тему «Методи і технології використання алгоритмів штучного інтелекту в програмно-конфігурованих мережах в умовах обмежених ресурсів» є завершеним, самостійно виконаним науковим дослідженням, у якому на високому теоретичному та прикладному рівні розв'язано актуальне науково-технічне

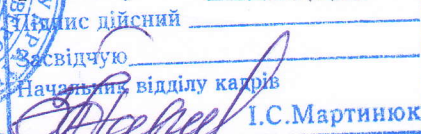
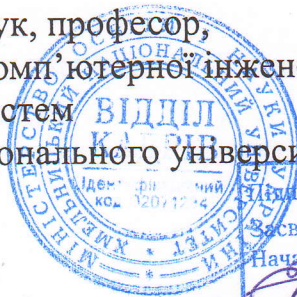
завдання щодо вдосконалення механізмів адаптивного керування доступом до критичних сервісних ресурсів у програмно-конфігурованих мережах.

Дисертаційна робота за своєю актуальністю, науковою новизною, ступенем обґрунтованості положень, достовірністю отриманих результатів та їх практичним значенням 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 КМУ № 341 від 21.03.2022 р., № 502 від 19.05.2023 р. та № 507 від 03.05.2024 р.). Вважаю, що Банар Анатолій Юрійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 - Телекомунікації та радіотехніка, у галузі знань 17 - Електроніка та телекомунікації.

Офіційний опонент,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри комп'ютерної інженерії
та інформаційних систем

Хмельницького національного університету

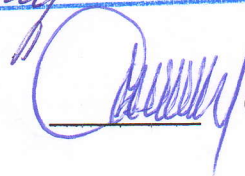


Олег САВЕНКО

«Підпис Савенка О.С. засвідчую»:

Проректор з наукової роботи

Хмельницького національного університету



Олег СИНЮК