

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Банара Анатолія Юрійовича
на тему *«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

Сучасний етап розвитку телекомунікаційних мереж характеризується стрімким зростанням обсягів трафіку, кількості підключених пристроїв, поширення хмарних сервісів, IoT/edge-інфраструктур та підвищення вимог до якості обслуговування. За таких умов класичні підходи до керування мережею, що ґрунтуються на статичних правилах, ручному адмініструванні та ізольованих механізмах QoS, не завжди забезпечують необхідну адаптивність і стабільність роботи.

Програмно-конфігуровані мережі створюють технологічну основу для гнучкого й централізованого керування мережевими ресурсами. Водночас практичне впровадження SDN супроводжується новими викликами, пов'язаними з навантаженням на SDN-контролер, обробкою телеметрії, затримками прийняття рішень та обмеженістю обчислювальних ресурсів. Особливо актуальними є ситуації, коли погіршення якості обслуговування спричинене не загальною нестачею пропускної здатності, а перевантаженням окремого критичного ресурсу сервісного рівня. У цьому контексті використання алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання в контурі керування SDN є обґрунтованим напрямом досліджень, оскільки дає змогу аналізувати телеметрію, прогнозувати перевантаження, виявляти нерівномірність споживання ресурсів та формувати адаптивні керуючі рішення.

З огляду на це дисертаційна робота Банара А. Ю., спрямована на розроблення та експериментальне обґрунтування методів і технологій використання алгоритмів штучного інтелекту в програмно-конфігурованих мережах в умовах обмежених ресурсів, є актуальною. Її результати відповідають сучасним тенденціям розвитку телекомунікаційних мереж у частині створення інтелектуальних, відмовостійких та енергоефективних архітектур управління мережним трафіком.

Оцінка змісту та завершеності дисертації

Дисертаційна робота Банара А. Ю. має чітку та логічно побудовану структуру, відповідає поставленій меті дослідження і послідовно розкриває поставлене науково-практичне завдання.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету й завдання роботи, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наведено наукову новизну, практичне значення результатів, відомості про апробацію, публікації та структуру дисертації.

Перший розділ присвячений аналізу сучасних тенденцій розвитку програмно-конфігурованих мереж та напрямів їх оптимізації за допомогою використання штучного інтелекту. Здобувач детально розглядає існуючі архітектури площини керування SDN, виявляє обмеження щодо латентності та обробки телеметрії в динамічних умовах, а також обґрунтовує необхідність інтеграції модулів інтелектуального керування в умовах дефіциту апаратних ресурсів периферійних пристроїв. Розділ формує теоретичну основу дослідження та обґрунтовує необхідність розроблення адаптивних методів керування SDN мережею.

Другий розділ присвячено методам побудови інтелектуальних SDN-мереж. У ньому розглянуто метрики оцінювання ефективності ML-моделей і справедливості розподілу ресурсів, обґрунтовано вибір моделей машинного навчання для задач SDN, а також проаналізовано платформи SDN-контролерів з погляду їх придатності до інтеграції ШІ. Автор не обмежується лише точністю моделей, а враховує також затримку прийняття рішень, ресурсні витрати та стабільність керуючого контуру при виборі оптимальної моделі.

У *третьому розділі* виконано проектування архітектури мережі та побудову фреймворку для інтеграції AI-компонентів у хмарні SDN-контролери. Докладно описано збір мережевої телеметрії, механізми взаємодії між площиною управління та інтелектуальними агентами з використанням програмних засобів із відкритим кодом. Розділ демонструє перехід від теоретичного обґрунтування до практичної реалізації запропонованих рішень.

Четвертий розділ містить результати апаратних досліджень і практичної реалізації запропонованої архітектури. У ньому проведено порівняльну оцінку моделей машинного навчання, проаналізовано затримку прийняття рішень, справедливість розподілу доступу, накладні витрати на апаратні засоби та енергоспоживання. Окремою перевагою роботи є наявність апаратної апробації в умовах обмежених ресурсів, а також реалізація прикладного веб-сервісу, REST API та засобів моніторингу. Отримані показники затримок, значення обраних

метрик, результати апаратної апробації підтверджують працездатність та прикладну ефективність дослідження.

Завершується дисертація загальними *висновками*, у яких узагальнено основні результати дослідження, наведено список використаних джерел та додатки. Загалом робота є завершеною, цілісною і послідовною. Її зміст охоплює повний цикл дослідження, від аналізу сучасного стану проблеми та формування методичної основи для розроблення архітектури – до побудови експериментального стенда, апаратної апробації та оцінювання ефективності запропонованих рішень.

Робота супроводжується достатньою кількістю схем, графіків, рисунків та порівняльних таблиць експериментальних даних, що дозволяє чітко простежити логіку автора, переконатися в достовірності наукових положень та оцінити високий інженерний потенціал дисертації.

Достовірність та новизна наукових положень

Наукові положення дисертації обґрунтовані достатньо. Вони підтверджуються аналізом літературних джерел, архітектурним проектуванням, реалізацією програмно-апаратних рішень і результатами експериментальних досліджень. Автор не обмежився лише концептуальними міркуваннями, а навів конкретні показники точності моделей штучного інтелекту, латентності прийняття рішень, апаратних накладних витрат площини керування та значеннями метрик розподілу доступу до ресурсів.

Висновки, наведені в роботі, відповідають змісту розділів та логічно впливають із отриманих результатів.

Результати наукової новизни дисертації:

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.

Важливість отриманих результатів для науки і практики, можливі шляхи використання результатів дослідження

Запропоновані рішення дисертаційної роботи мають високу практичну цінність, алгоритми та фреймворк доведені до рівня працездатних програмних систем і протестовані в умовах реальних апаратних обмежень мережевого обладнання. Найбільш важливими практичними результатами дослідження є:

- Створено та експериментально верифіковано Cloud-AI-SDN фреймворк у зв'язці з емуляційним середовищем Mininet та програмним комутатором Open vSwitch під керуванням контролера Ryu, що дозволяє відтворювати моделювати сценарії критичного навантаження та динамічного застосування політик доступу через OpenFlow 1.3.

- Реалізовано прикладний веб-сервіс та ШІ-модуль із дворівневою архітектурою (шари API-інтерфейсу та операційної логіки), що забезпечує повну ізоляцію обчислювальних затратних операцій машинного навчання від критичного контуру обробки подій SDN-контролера.

- Забезпечено архітектурну незалежність інтелектуальної підсистеми завдяки використанню уніфікованих інтерфейсів взаємодії (REST NBI та подієвого каналу MQTT), що дозволяє оперативно та безшовно здійснювати заміну, модифікацію чи чергування обчислювальних моделей (від легковагової Logistic Regression до високоточної Gradient Boosting та ін.) під конкретні ресурсні бюджети без потреби у зупинці чи реконфігурації ядра прикладного веб-сервісу та мережі в цілому.

- Виконано повноцінну апаратну апробацію розроблених рішень на базі одноплатного комп'ютера ARM-архітектури Raspberry Pi 5 з інструментальним вимірюванням накладних витрат процесу ШІ-агента за показниками завантаження CPU, оперативної пам'яті процесу та фізичного енергоспоживання, що підтвердило готовність системи до автономного розгортання в обмежених умовах.

Наукове значення отриманих результатів полягає у формалізації чітких критеріїв вибору моделей машинного навчання для завдань мережевого управління на основі компромісу між розпізнавальною здатністю алгоритму та його обчислювальною вартістю. Для проектувальників реальних інфокомунікаційних систем це має безпосереднє методологічне значення, оскільки дозволяє обґрунтувати перехід до конкретної математичної моделі ШІ залежно від поточної латентності керуючого каналу та обчислювального потенціалу крайових вузлів.

Отримані результати можуть бути використані у периферійних обчислювальних вузлах та IoT-екосистемах, критичних елементах

корпоративних та приватних хмарних інфраструктур, навчальному процесі профільних кафедр при формуванні дисциплін з інтелектуального управління сучасними телекомунікаційними мережами.

Методи досліджень, які використані в дисертаційній роботі

Для виконання дисертаційної роботи автором використано комплекс теоретичних, експериментальних і прикладних методів. Зокрема, застосовано системний аналіз сучасних підходів до побудови SDN-мереж та інтеграції алгоритмів штучного інтелекту, імітаційне моделювання мережевих сценаріїв, методи машинного навчання для побудови моделей прийняття рішень, методи математичної статистики для аналізу телеметрії та експериментальних результатів, а також методи програмної інженерії для реалізації Cloud-AI-SDN фреймворку, REST API, веб-сервісу та засобів моніторингу.

Для підтвердження отриманих результатів використано експериментальні дослідження на програмно-апаратному стенді, аналіз показників рівномірності розподілу доступу, латентності прийняття рішень, завантаженість CPU/RAM та енергоспоживання. Обраний набір методів є коректним і достатнім для розв'язання поставлених завдань, оскільки поєднує теоретичний аналіз, моделювання, практичну реалізацію та апаратну апробацію запропонованих рішень.

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 ширококугових телекомунікаційних систем та Інтернету речей» (державний реєстраційний номер 121U112870, 2021-2025 рр.).

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях

Матеріали дисертаційної роботи Банара А. Ю. висвітлено у 9 наукових публікаціях, що пройшли відповідне рецензування. Здобувачем опубліковано 1 статтю у вітчизняному фаховому виданні, яке індексується у наукометричній базі Scopus (Q3), та 3 статті у наукових фахових виданнях України. Апробація результатів дослідження на міжнародному й національному рівнях

підтверджується 4 працями, опублікованими у збірниках тез і матеріалах профільних наукових конференцій.

Відповідність дисертації встановленим вимогам

Дисертаційна робота відповідає встановленим нормативним вимогам до робіт на здобуття ступеня доктора філософії. Вона включає вступ, чотири основні розділи, загальні висновки, список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг роботи становить 159 сторінок, містить 57 рисунків, бібліографічний список із 118 джерел та додатки.

За структурою, змістом і оформленням робота відповідає Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради, затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 № 44, а також Вимогам до оформлення дисертації, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 № 40.

Ілюстративний матеріал у цілому є достатнім для розуміння архітектурних рішень, логіки побудови експериментального стенда та порівняння отриманих характеристик. Опис програмних, апаратних та експериментальних компонентів роботи дозволяє відтворити загальну логіку побудови Cloud-AI-SDN фреймворку та оцінити практичну доцільність запропонованих рішень.

Структура викладення є послідовною, від аналізу проблеми та вибору технічного стеку до побудови інтелектуального SDN-середовища, експериментальної перевірки, апаратної апробації та практичної реалізації запропонованої архітектури. У роботі чітко простежується взаємозв'язок між метою, завданнями, методами, науковою новизною, практичним значенням і підсумковими висновками.

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертаційного дослідження

1) У роботі реалізовано Prometheus/Grafana-моніторинг системних і прикладних метрик. Водночас доцільно було б чіткіше показати, які саме метрики використовуються безпосередньо AI-агентом для прийняття рішень, а які застосовуються лише для візуального контролю, діагностики та пояснення результатів експерименту.

2) Автором зроблено акцент на локалізації керуючого впливу в точці дефіциту прикладного ресурсу, що є важливою перевагою запропонованого методу. Проте було б корисно детальніше розглянути межі застосовності цього

підходу, у яких випадках локальне обмеження є достатнім, а коли все ж необхідне коригування глобальних QoS-параметрів мережі.

3) У роботі показано ефективність запропонованого підходу для контрольованої SDN-топології, проте викликає інтерес питання масштабування результатів на більшу кількість клієнтів, комутаторів, потоків і одночасних сервісів. Було б корисно оцінити, як змінюються затримки, метрики розподілу доступу та накладні витрати при збільшенні масштабу мережі.

4) В пункті 3.4.2 зазначено, що ймовірність перевищення квоти $p_i(t)$ порівнюється із заданим порогом ризику t_{high} для активації обмежень. Доречним було б пояснити, на основі яких критеріїв або оптимізаційних задач визначається конкретне значення порогу t_{high} , та як саме його зміна впливає на компроміс між загальною пропускнуою здатністю системи та метриками розподілу доступу.

5) Основний експериментальний сценарій пов'язаний з обмеженням ресурсом типу IoT TokenServer API. Було б доцільно розширити експериментальну перевірку ще на кілька типів прикладних ресурсів, наприклад сервіс авторизації, API з варіативними лімітами, шлюз доступу до сховища даних, щоб підтвердити універсальність запропонованого методу.

6) Мережева телеметрія в умовах перевантажень або аномалій часто характеризується суттєвим дисбалансом класів (часових вікон або запитів із перевищеннями лімітів значно менше, ніж нормальних транзакцій). У тексті роботи недостатньо висвітлено, чи застосовувалися спеціалізовані підходи до боротьби з дисбалансом класів під час підготовки навчального журналу *training_log.csv*.

Зазначені дискусійні положення та зауваження не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи, не ставлять під сумнів її наукову новизну, практичну цінність і достовірність 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 науковим дослідженням, яке містить нові науково обґрунтовані результати та розв'язує важливе науково-прикладне завдання покращення адаптивного керування доступом до обмежених ресурсів у програмно-конфігурованих мережах із використанням алгоритмів штучного інтелекту.

За науковим рівнем, практичною цінністю, апробацією та публікаціями (зокрема проіндексованих у базі даних Scopus), повнотою висновків і рекомендацій 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), а її автор, 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,
завідувач кафедри інформаційних систем
та технологій
Державного університету інформаційно-
комунікаційних технологій



Каміла СТОРЧАК

Підпис Сторчак К.П. з а с в і д ч у ю:

Учений секретар
Державного університету
інформаційно-комунікаційних технологій



Галина ЄНЧЕВА

03.06.2026р