

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, доцента

ЛПІ'ЯНІНОЇ-ГОНЧАРЕНКО Христини Володимирівни

на дисертаційну роботу

ШУБИНА Богдана Петровича

на тему

**«Методи та моделі побудови інтелектуальних інформаційно-комунікаційних систем
автоматизованого управління інфраструктурою»,**

подану до разової спеціалізованої вченої ради на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі 12 Інформаційні технології, за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки

Актуальність теми та зв'язок з науковими планами та програмами. Сучасний вектор цифрової трансформації, окреслений переходом до концепції «Індустрія 5.0», актуалізує широкомасштабне запровадження технологій Інтернету речей, периферійних обчислень, штучного інтелекту та автономних роботизованих систем. Існуючі інформаційно-комунікаційні системи автоматизованого управління мають обмежену масштабованість та не пристосовані до постійно зростаючої кількості інтелектуальних кінцевих пристроїв, таких як автономні транспортні засоби. Додатковими обмежуючим фактором є дефіцит репрезентативних навчальних вибірок, необхідних для коректного навчання нейронних мереж, що пов'язано із політиками обмеженого доступу до інформації, яка містить комерційну таємницю. Ефективним механізмом мінімізації означених ризиків є технологія федеративного навчання, яка передбачає децентралізоване формування моделей безпосередньо на локальних пристроях без централізованого збору приватних даних. Саме дослідженню цих аспектів присвячена дисертаційна робота Шубина Б. П., у якій пропонуються нові методи та моделі інтеграції федеративного навчання в інформаційно-комунікаційних системах автоматизованого управління.

Дослідження виконано в руслі тематичних НДР НУ «Львівська політехніка», зокрема в межах держбюджетних проєктів: «Розроблення новітньої децентралізованої мережі мобільного зв'язку на основі блокчейн-архітектури та штучного інтелекту для впровадження технологій 5G/6G в Україні» (2020–2022 рр., № 0120U100674), «Розроблення інноваційних методів та моделей побудови інтелектуальних інформаційно-комунікаційних систем для цифровізації промисловості» (2022–2024 рр., № 0122U000817) і «Розроблення інноваційних методів та засобів розгортання інтелектуальної інформаційної інфраструктури для подвійного використання в умовах цифрової трансформації України» (2023–2025 рр., № 0123U100232). Додатково робота підтримана програмою Norway Grants 2014–2021 (Національний центр досліджень та розвитку Польщі) у межах проєкту «Автономні транспортні візки, інтегровані з колаборативними роботами для інтелектуальної промисловості» (контракт NOR/POL-NOR/CoBotAGV/0027/2019-00).

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни. В результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень, автор отримав нові та оригінальні наукові результати, зокрема:

1. Вперше розроблено метод багатораундного федеративного навчання, який на відміну від відомих, використовує хронологічну стратифікацію навчальної вибірки, з поетапним усередненням агрегованих моделей кожного раунду, що дало змогу знизити складність обчислень для мобільних кінцевих пристроїв федеративного навчання при збереженні точності результуючої агрегованої моделі.

2. Вперше розроблено структурно-функціональну модель інтелектуальної інформаційно-комунікаційної системи, яка, на відміну від відомих, базується на відокремленні площини пристроїв, площини передавання даних, площини автоматизованої інфраструктури та площини інтелектуальної обробки даних, що взаємодіють на основі спільного онтологічного ядра, що дало змогу забезпечити інтероперабельність та обмін локальними навченими моделями між різними виробничими та невиробничими інфраструктурами в процесі федеративного навчання.

3. Удосконалено метод обчислення параметрів агрегованої моделі, шляхом введення додаткового середньозваженого критерію оцінювання ефективності локальних моделей кінцевих пристроїв, що дало змогу підвищити ефективність процесу федеративного навчання за рахунок зниження вагомості статистичних викидів та помилок локальних моделей при обчисленні агрегованої моделі.

Основні теоретичні положення підтверджено імітаційним моделюванням та експериментальним тестуванням на основі реальних роботизованих систем AGV Formica-1 в промисловому середовищі, а також впроваджено в навчальному процесі та науково-дослідній роботі.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності. Дисертаційне дослідження Богдана Петровича Шубина повністю відповідає вимогам Стандарту вищої освіти спеціальності 122 Комп'ютерні науки і тематично збігається з актуальними науковими напрямками розроблення інтелектуальних систем автоматизованого управління та методів децентралізованого машинного навчання.

Логічна структура роботи свідчить про завершений характер дослідження: чітко сформульовано мету, конкретизовано завдання, послідовно викладено аналітичний огляд, етап проектування та експериментальну перевірку, а в підсумку наведено практичні рекомендації щодо впровадження результатів.

Фактичне застосування здобутих рішень підтверджується актами впровадження, а їх наукова апробація доповідями на конференціях IEEE і публікаціями в журналах, що індексуються базами Scopus і Web of Science. Узгодженість висновків із поставленими завданнями додатково засвідчує цілісність виконаної роботи.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Шубина Богдана Петровича є результатом самостійних досліджень

здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Аналіз змісту дисертації та основні результати роботи. Дисертація викладена державною мовою, відзначається послідовністю викладу та коректним уживанням фахової лексики в галузі інформаційних технологій. Її зміст цілком відповідає вимогам освітнього стандарту для вказаної спеціальності й охоплює актуальний напрям децентралізованого машинного навчання, застосованого до інтелектуальних інформаційно-комунікаційних систем автоматизованого управління.

Дисертаційна робота оформлена згідно з вимогами наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації». Робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури з 188 джерел і двох додатків. Загальний обсяг становить 150 сторінок, із них 102 сторінки основного тексту, з яких 48 рисунків та 12 таблиць.

У вступі обґрунтовано вибір теми, сформульовано мету, об'єкт і предмет дослідження, окреслено новизну й практичну цінність, наведено перелік публікацій автора.

У першому розділі дисертації здійснено ґрунтовний аналіз сучасних методів і моделей побудови інформаційно-комунікаційних систем автоматизованого управління індустріальною інфраструктурою з урахуванням еволюції до «Індустрії 5.0». Показано, що нові вимоги до кіберфізичних виробничих і невиробничих комплексів актуалізують децентралізовані периферійні обчислення та федеративне машинне навчання. Водночас виокремлено ключові обмеження щодо їх інтеграції в індустріальних умовах.

Другий розділ формує цілісну методологічну основу впровадження федеративного навчання на всіх рівнях інформаційно-комунікаційної системи від периферійних пристроїв до хмарного інтелектуального ядра. Запропонована ієрархічна структурно-функціональна модель, що базується на децентралізації обчислювальних ресурсів і стандартизованих інтерфейсах, забезпечує масштабованість, відмовостійкість і горизонтальне перенесення знань між галузями. У межах цієї моделі розроблено середньозважений критерій оцінювання локальних моделей та відповідний метод обчислення параметрів агрегованої моделі. Окрім того, описано алгоритм багатораундного федеративного навчання з хронологічною стратифікацією вибірки для пристроїв із обмеженими обчислювальними можливостями.

Третій розділ присвячено імітаційному моделюванню та експериментальній оцінці ефективності запропонованих алгоритмів. На телеметричних даних автономних пристроїв із різною кількістю раундів навчання доведено, що вагове агрегування за актуальною прогностичною точністю дозволяє знизити середньоквадратичну та середню абсолютну помилку на 19 % порівняно з традиційними підходами, підтверджуючи практичну доцільність запропонованого рішення для індустріальних систем управління.

Четвертий розділ висвітлює практичну реалізацію інтелектуальної інформаційно-

комунікаційної системи на базі периферійних роботизованих платформ AGV Formica-1. Реалізовано наскрізний контур «дані-аналітика-управління», у межах якого запроваджено федеративне навчання нейронних мереж. Експериментальні результати засвідчили підвищення енергоефективності процесу федеративного навчання на кінцевих пристроях на 37 % при чотирьох раундах і на 50 % при восьми раундах за збереження тієї самої точності часових прогнозів.

У висновках узагальнено наукові та прикладні результати роботи: сформульовано та розв'язано задачу вдосконалення методів і моделей федеративного машинного навчання в інформаційно-комунікаційних системах автоматизованого управління, що забезпечує підвищення точності прийняття рішень за умов неповноти й нестаціонарності даних та обмежених ресурсів кінцевих пристроїв.

Теоретичне та практичне значення одержаних результатів. Теоретичне значення дисертаційної роботи полягає у розробленні нових та удосконаленні наявних методів федеративного машинного навчання для інтелектуальних інформаційно-комунікаційних систем автоматизованого управління інфраструктурою. Зокрема, важливим внеском є створення методу багатораундного федеративного навчання із хронологічною стратифікацією вибірки, який забезпечує зниження складності обчислень для периферійних мобільних пристроїв, а також удосконалення процедури агрегації локальних моделей за рахунок введення середньозваженого критерію оцінювання їхньої ефективності. Теоретично обґрунтовано структурно-функціональну модель інтелектуальної інформаційно-комунікаційної системи, яка вперше поєднує площини пристроїв, передавання даних, автоматизованої інфраструктури та інтелектуальної обробки через спільне онтологічне ядро, забезпечуючи таким чином інтероперабельність і горизонтальне перенесення знань між галузями.

Практичне значення отриманих результатів підтверджується реалізацією запропонованих методів і моделей у реальному виробничому середовищі на базі автономних мобільних платформ AGV Formica-1. Проведені експерименти показали зниження середньоквадратичної та середньої абсолютної помилки прогнозування до 19 % порівняно з базовими методами федеративного навчання, а також істотне підвищення енергоефективності периферійних пристроїв (до 50 % економії при восьми раундах навчання). Розроблене програмне забезпечення та отримані алгоритмічні рішення впроваджено в науково-дослідну та освітню діяльність НУ «Львівська політехніка», а також у рамках міжнародного проєкту Norway Grants 2014–2021.

Таким чином, результати дисертаційної роботи сприяють підвищенню ефективності автоматизованого управління складними індустріальними інфраструктурами, мають значний потенціал масштабування та інтеграції в суміжні галузі, зокрема у сферу розумної логістики, транспортних систем, розумного виробництва та інших технологічних комплексів, що активно впроваджують технології штучного інтелекту, периферійних обчислень та Інтернету речей.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи. Наукові результати дисертації висвітлені у в 25 наукових праць, серед яких: 2 статті у наукових фахових періодичних виданнях України; 12 статей у наукових періодичних виданнях інших держав, які включені до наукометричних баз Scopus/Web of Science; 1 стаття у періодичному виданні України, 10 публікацій у матеріалах науково-технічних конференцій.

Наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Зауваження до дисертаційної роботи

1. У першому розділі дисертаційної роботи, не достатньо уваги присвячено аспектам безпеки реалізації алгоритмів федеративного навчання у виробничому середовищі. Зокрема, відсутній огляд сучасних атак на системи федеративного навчання, такі як «отруєння» даних, інверсія моделей та зловмисна поведінка вузлів.

2. При дослідженні енергоефективності, не достатньо деталізовано метрики, які впливають на обчислювальне навантаження центрального сервера, що не дає змоги оцінити системний ефект від впровадження запропонованого алгоритму федеративного навчання.

3. При описі методу багатораундного федеративного навчання з хронологічною стратифікацією навчальної вибірки не проведено формального аналізу впливу ефекту катастрофічного забування, а також впливу довжини вікна усереднення на узагальнювальну здатність моделі.

4. При експериментальному дослідженні розроблених алгоритмів, не проведено порівняння обсягів переданих даних (байт/пакетів) у мережі для кожного сценарію (1/4/8 раундів), що не дає в повній мірі оцінити енергоспоживання при передаванні даних між кінцевим пристроєм та агрегуючим сервером.

5. У роботі не наведено коду програмного забезпечення, яке було використано для тренування моделей на кінцевих пристроях NVIDIA Jetson Nano, а також деталей про використані бібліотеки, що ускладнює відтворюваність запропонованих автором алгоритмів рішень.

6. Під час експериментальної перевірки використано переважно телеметрію з пристроїв розумного виробництва, доречним виглядало б додати хоча б один відкритий промисловий чи медичний набір даних, аби показати універсальність підходу при більшій варіативності вхідних параметрів та інформативних ознак.

7. При описі структурно-функціональної моделі інтелектуальної інформаційно-комунікаційної системи, доцільно було представити приклад взаємодії та обміну локальними навченими моделями між різними індустріями, що суттєво б розширило спектр застосування розроблених автором рішень в контексті сучасних тенденцій розвитку мультимодальних моделей штучного інтелекту.

Зазначені зауваження мають уточнювальний характер і не ставлять під сумнів наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів.

Висновок про дисертаційну роботу. Дисертаційне дослідження Шубина Богдана Петровича «Методи та моделі побудови інтелектуальних інформаційно-комунікаційних систем автоматизованого управління інфраструктурою» виконано на належному теоретичному й експериментальному рівнях, відповідає принципам академічної доброчесності та є завершеною науковою працею.

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання розроблення нових та вдосконалення існуючих методів та моделей федеративного машинного навчання для інформаційно-комунікаційних систем автоматизованого управління, з метою підвищення точності в умовах неповноти, нестационарності даних та обмеженості обчислювальних ресурсів кінцевих пристроїв, що має важливе значення для галузі знань 12 Інформаційні технології та спеціальності 122 Комп'ютерні науки.

Дисертація відповідає як обраній спеціальності, так і встановленим 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 Шубин Богдан Петрович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки.

Офіційний опонент

доктор технічних наук, доцент,
доцент кафедри інформаційно-обчислювальних
систем і управління
Західноукраїнського національного
університету

Христина ЛІП'ЯНИНА-ГОНЧАРЕНКО

