

**Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного університету «Львівська політехніка»
доктору технічних наук, доценту
Вікторії ВИСОЦЬКІЙ**

РЕЦЕНЗІЯ

**доцента кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Навчально-
наукового інституту інформаційно-комунікаційних технологій та
електронної інженерії
Національного університету «Львівська політехніка»
к.т.н. Шпур Ольги Миколаївни на дисертаційну роботу Шубина Богдана
Петровича
"Методи та моделі побудови інтелектуальних
інформаційно-комунікаційних систем автоматизованого управління
інфраструктурою",
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
в галузі знань 12 «Інформаційні технології»
та спеціальності 122 «Комп'ютерні науки»**

Сучасне промислове та інфраструктурне середовище зазнає інтенсивної трансформації у напрямі впровадження кіберфізичних систем, в яких цифрові інформаційні процеси тісно інтегруються з фізичними виробничими механізмами. У таких системах телеметричні дані формуються безперервно, у режимі реального часу, численними пристроями Інтернету речей, які розташовані безпосередньо у виробничому середовищі. Забезпечення достовірності, актуальності й захищеності цих даних на етапі їх обробки є надзвичайно важливим завданням.

Традиційні централізовані підходи до збору та оброблення даних у таких умовах створюють надмірне навантаження на інформаційно-комунікаційну інфраструктуру, підвищують енергоспоживання кінцевих пристроїв та збільшують часову затримку прийняття рішень. Ці фактори істотно знижують ефективність систем автоматизованого управління в умовах динамічно змінюваного середовища. У таких сценаріях виникає потреба у відмові від централізованих схем на користь децентралізованих обчислювальних парадигм.

Застосування граничних обчислень у поєднанні з технологією федеративного машинного навчання відкриває нові можливості щодо побудови стійких та адаптивних систем інтелектуального управління. Федеративне навчання дозволяє здійснювати локальне тренування моделей без необхідності централізованого передавання первинних даних, що не лише зберігає

конфіденційність технологічної інформації, а й значно зменшує обсяг передаваного трафіку та навантаження на мережу. У такий спосіб істотно підвищується швидкодія прийняття рішень та енергоефективність периферійних вузлів.

Із розвитком гібридних архітектур, які об'єднують обчислювальні ресурси на рівнях кінцевих пристроїв та хмарних серверів, створюються технічні передумови до реалізації адаптивних, ієрархічно організованих протоколів, здатних працювати у реальному часі, з урахуванням обмеженості доступних обчислювальних потужностей, енергетичних ресурсів та каналів зв'язку.

Саме цим важливим аспектам присвячена дисертаційна робота Шубина Богдана Петровича у якій пропонуються нові методи та моделі побудови інтелектуальних систем управління індустріальною інфраструктурою на основі методів федеративного навчання.

Ступінь обґрунтованості та достовірності основних наукових положень, висновків і рекомендацій

У роботі послідовно поєднано теоретичні засади із практичними аспектами, які взаємодоповнюють викладення основних наукових результатів. У процесі дослідження використано методи математичної статистики, ймовірнісного аналізу та комп'ютерного моделювання, що забезпечило належний рівень формалізації об'єктів та процесів, а також дозволило здійснити кількісне оцінювання ефективності функціонування розроблених алгоритмів.

Експериментальна частина дисертації ґрунтується на чітко визначених передумовах і параметрах досліджуваного середовища, а критерії порівняння результатів подано у формалізованому вигляді. Такий підхід сприяє відтворюваності експериментів та підвищує об'єктивність висновків. Практична апробація запропонованих рішень реалізована у двох взаємодоповнювальних напрямках. По-перше, проведено імітаційне моделювання із використанням відкритого датасету Numenta Anomaly Benchmark, що дало змогу дослідити поведінку алгоритмів у контрольованих умовах. По-друге, виконано натурні експерименти на реальних периферійних пристроях із автономним управлінням. Узгодженість результатів обох типів випробувань свідчить про достовірність і надійність отриманих висновків.

Ефективність запропонованих рішень підтверджена актами впровадження на підприємствах-партнерах, що засвідчує їхню практичну реалізованість і відповідність потребам індустріального середовища. Основні наукові положення та результати дисертації презентовано на профільних міжнародних конференціях під егідою IEEE, а також опубліковано у наукових виданнях,

індексованих у базах Scopus та Web of Science, де вони пройшли процедуру незалежного рецензування.

Таким чином, ступінь обґрунтованості, достовірності та апробації наукових результатів дисертаційної роботи можна вважати достатнім. Отримані автором результати мають завершений вигляд і органічно доповнюють наявні дослідження у галузі розподілених інформаційно-комунікаційних систем.

Наукова новизна дисертаційної роботи

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.

Повнота викладу результатів дисертаційної роботи у наукових публікаціях

За результатами дисертаційної роботи опубліковано 25 наукових праць, з них: 2 статті у наукових фахових періодичних виданнях України, 12 статей у наукових періодичних виданнях інших держав, які включені до наукометричних баз, 1 стаття у періодичному виданні України, 10 публікацій у матеріалах міжнародних та всеукраїнських наукових, науково-технічних конференцій. Опубліковані праці повною мірою висвітлюють основні положення та результати дисертації.

Важливість одержаних результатів для науки і техніки та перспективи їх використання

Дисертаційна робота має як фундаментальну, так і прикладну цінність, поєднуючи розвиток теоретичних підходів до відмовостійких обчислень у розподілених середовищах із практичним застосуванням у реальних промислових умовах. На теоретичному рівні автором розширено сучасні уявлення про децентралізоване машинне навчання шляхом побудови формально описаної схеми багатораундного федеративного навчання, яка включає вагове агрегування локальних моделей. Запропоноване рішення є уніфікованим та може бути інтегроване у широкий спектр архітектур хмарних та граничних обчислень, у неоднорідному та потенційно ненадійному середовищі.

Окрему наукову новизну становить розроблений критерій хронологічної стратифікації навчальних вибірок, що дає змогу адаптувати алгоритми навчання до умов нестаціонарних даних без втрати збіжності. Такий підхід забезпечує коректну побудову моделей у ситуаціях, де зміна розподілу даних є типовою, таких як задачі прогнозування в індустріальних системах з циклічними або стохастичними режимами роботи.

З прикладної точки зору, результати дослідження мають високу практичну значущість у контексті функціонування інтелектуальних інформаційних систем в умовах виробничого середовища, які характеризуються нестабільними мережевими затримками, частковими відмовами вузлів та обмеженими енергетичними ресурсами. Запропоновані алгоритми демонструють підвищену стійкість до мережових флуктуацій та забезпечують ефективне використання енергоресурсів периферійних пристроїв, що є критично важливим для систем з великою кількістю автономних мобільних агентів.

Результати дослідження апробовано у виробничому середовищі ТОВ «Максітех», де інтеграція запропонованого підходу у групу маршрутизаторів сприяла підвищенню точності прогнозування пропускної здатності каналу та оцінювання рівня QoE.

У сфері вищої освіти напрацювання вже впроваджено в навчальний процес кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка». Зокрема, відповідні підходи включено до змісту дисциплін «Інтернет речей та 5G-технології» та «Технології машинного навчання та штучного інтелекту», що сприяє поширенню результатів дослідження серед фахової аудиторії та підготовці компетентних спеціалістів у відповідній галузі.

З прикладної точки зору отримані напрацювання демонструють свою ефективність на прикладі застосування в середовищі промислових систем, де нестабільні затримки та часткові відмови вузлів є нормою. Запропоновані

алгоритми підвищують стійкість інтелектуальних інформаційних систем до мережеских коливань та мінімізують енергоспоживання периферійних пристроїв, що особливо важливо для виробничих майданчиків із великою кількістю автономних агентів.

Загальна характеристика дисертаційної роботи

Дисертаційна робота відповідає встановленим вимогам до оформлення. Структурно дослідження складається зі вступу, чотирьох змістовних розділів, висновків, списку літератури й двох додатків. Загальний обсяг становить 150 сторінок, з яких 102 сторінки основного тексту. В роботі є 48 рисунків, 12 таблиць та бібліографічний перелік з містить 188 джерел.

У вступі обґрунтовано вибір тематики дослідження, сформульовано мету й основні наукові завдання, охарактеризовано наукову новизну, практичну значущість отриманих результатів та визначено зв'язок виконаного дослідження з держбюджетними проектами кафедри.

У першому розділі наведено огляд сучасного стану наукових досліджень і технологічних рішень у сфері побудови інтелектуальних інформаційно-комунікаційних систем та реалізації аналітики даних в децентралізованих обчислювальних середовищах. Проведено порівняльний аналіз централізованих і федеративних підходів до побудови моделей машинного навчання в умовах нестабільних каналів зв'язку та обмежених обчислювальних ресурсів. Доведено, що централізовані схеми оброблення поступаються федеративним щодо показників масштабованості, конфіденційності й адаптивності до мережеских коливань. Сформульовано низку відкритих проблем, серед яких особливу увагу приділено завданням своєчасного виявлення відмов та ефективного використання енергоресурсів периферійних вузлів.

Другий розділ присвячено власним теоретичним і алгоритмічним розробкам. Запропоновано ієрархічну структурно-функціональну модель інформаційно-комунікаційної системи із включенням четвертого аналітичного рівня, який забезпечує локальну обробку даних із можливістю часткової агрегації результатів. Розроблено адаптивний метод вагового агрегування локальних моделей, що враховує їх актуальну прогностичну точність. Запропоновано багатораундний метод федеративного навчання з хронологічною стратифікацією даних, яка забезпечує коректне функціонування моделі на нестационарних вибірках.

У третьому розділі подано результати комплексної експериментальної перевірки ефективності розроблених рішень у задачах прогнозування на основі телеметричних даних автономних пристроїв. Запропонований метод контекстно-адаптивного зважування локальних моделей дозволив досягти середнього

зменшення середньоквадратичної та середньої абсолютної похибки на рівні 19 % у порівнянні з базовим методом FedAvg. Додаткове впровадження багатораундного методу навчання забезпечило до 10 % приросту точності в залежності від кількості раундів і умов функціонування мережі.

У четвертому розділі наведено результати натурного експерименту із застосуванням роботизованих мобільних платформ AGV Formica-1. Показано, що розроблений алгоритм федеративного навчання забезпечує зменшення енергоспоживання під час тренування моделей на кінцевих пристроях на 37 % за умови чотирьох раундів навчання, і до 50 % за умови восьми раундів. При цьому точність прогнозування часових характеристик системи зберігається на незмінному рівні. У додатках наведено акти впровадження результатів та перелік публікацій і матеріалів апробації.

Зауваження та рекомендації до дисертаційної роботи

1. В першому розділі значну увагу приділено різним архітектурам взаємодії пристроїв між собою в процесі федеративного навчання, проте в подальшому при розробці власних методів, автор не враховує різні архітектури а розглядає лише базовий підхід до горизонтального федеративного навчання з центральним сервером.

2. В роботі не проведено дослідження залежності точності агрегованих моделей від кількості кінцевих пристроїв, які приймають участь у процесі федеративного навчання. Експериментальні дослідження проведено лише для невеликої кількості пристроїв (<10). Таким чином, на зовсім зрозуміло чи будуть запропоновані методи ефективно працювати при великій кількості вузлів, наприклад 100, 1000, і т.д.

3. В концепції федеративного навчання будь-який пристрій може впливати на загальну агреговану модель, що створює значні ризики для зовнішніх атак на систему, таких як фальсифікація даних або інверсія моделей. Тому, доцільно було розглянути механізми забезпечення консенсусу між вузлами, так як це передбачено у блокчейн мережах.

4. Експериментальні дослідження у четвертому розділі показують вииграш розробленого алгоритму з точки зору енергетичного споживання в процесі федеративного навчання, однак не зовсім зрозуміло який економічний ефект від даного алгоритму в масштабі сумарного енергоспоживання індустріальної інфраструктури.

5. Враховуючи сучасні тренди розвитку безпілотних транспортних засобів, цікаво було б дослідити ефективність розроблених алгоритмів федеративного навчання для обміну досвідом між усіма автомобілями в глобальному світовому масштабі.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Шубина Богдана Петровича на тему «Методи та моделі побудови інтелектуальних інформаційно-комунікаційних систем автоматизованого управління інфраструктурою» виконана на високому науковому рівні, є завершеним самостійним науковим дослідженням, яке виконане з дотриманням принципів академічної доброчесності. Наведені зауваження до дисертаційної роботи не зменшують наукової значущості отриманих результатів.

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, нестаціонарності даних та обмеженості обчислювальних ресурсів кінцевих пристроїв, що має вагоме значення для галузі знань 12 «Інформаційні технології» та спеціальності 122 «Комп'ютерні науки».

Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», а також Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 зі змінами), а її автор заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

кандидат технічних наук,
доцент кафедри інформаційно-комунікаційних технологій
Національного університету
"Львівська політехніка",



Ольга ШПУР

Підпис к.т.н. Ольги ШПУР засвідчую
Вчений секретар
Національного університету
«Львівська політехніка»
к.т.н., доцент



Роман БРИЛИНСЬКИЙ