

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

РЕЦЕНЗІЯ

**професора кафедри інформаційно-комунікаційних технологій
Навчально-наукового інституту інформаційно-комунікаційних
технологій та електронної інженерії
Національного університету «Львівська політехніка»
д.т.н., доц. Бешлея Миколи Івановича 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»**

Актуальність теми. У контексті інтенсивної цифровізації виробничих процесів, характерної для епохи Індустрії 4.0/5.0, коли в рамках кіберфізичних систем функціонують тисячі сенсорів і виконавчих пристроїв, що формують потоки даних телеметрії, особливої актуальності набуває розроблення інтелектуальних інформаційно-комунікаційних систем автоматизованого управління. Забезпечення безперервності їх функціонування, достовірності даних та своєчасного прийняття рішень у динамічному, гетерогенному середовищі з обмеженими ресурсами є одним із ключових завдань сучасної промислової автоматизації.

Існуючі інформаційно-комунікаційні системи автоматизованого управління мають ряд обмежень зумовлених централізацією оброблення даних та побудови моделей машинного навчання. Це призводить до обмеженої масштабованості, проблемі обміну приватними даними кінцевих пристроїв, а також низької ефективності використання енергоресурсів. У таких умовах перспективним варіантом є використання концепції федеративного машинного навчання, яка дає змогу здійснювати тренування моделей без передавання первинних даних у хмарні сервісні платформи. Крім того, оперативне виявлення аномалій, які можуть свідчити про відмови пристроїв або погіршення режимів їх роботи, є критично важливим для підтримки функціональної цілісності технологічних ліній та автономних мобільних систем.

У зв'язку з розвитком граничних обчислень та розвитком обчислювально-ефективних методів машинного навчання виникають нові можливості для побудови інтелектуальних інформаційно-комунікаційних систем, які здатні у режимі реального часу прогнозувати потенційні відмови обладнання, оптимізувати структуру споживання енергоресурсів у системах з обмеженими обчислювальними можливостями та забезпечувати своєчасне прийняття керуючих рішень у гібридному середовищі індустріальних інформаційно-комунікаційних систем.

Саме тому, актуальним є поставлене в дисертаційній роботі Шубина Богдана Петровича 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.

Ступінь обґрунтованості та достовірності основних наукових положень, висновків і рекомендацій. Основні наукові положення дисертаційної роботи адекватно обґрунтовані та не суперечать сучасній теорії систем штучного інтелекту та принципам побудови розподілених інформаційно-комунікаційних систем. Запропоновані методи та моделі строго формалізовано з використанням математичного апарату теорії ймовірності, математичної статистики, що забезпечує коректність висновків і можливість аналітичної оцінки їх збіжності та обчислювальної складності. Наукові результати дисертаційної роботи доповідались на науково-практичних конференціях, зокрема і тих що проходили під егідою IEEE та індексуються в наукометричних базах. Результати дисертаційної роботи Шубина Б.П. перевірені на практиці, що підтверджено відповідними актами впровадження. Нові наукові результати, які отримані автором доповнюють попередньо відомі наукові дослідження за напрямком дисертаційної роботи.

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, 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. Результати дисертаційної роботи мають вагому теоретичну та прикладну цінність для подальшого розвитку інтелектуальних розподілених систем управління цифровізованими виробничими та невиробничими інфраструктурами. Запропоновані методи багатораундного федеративного навчання, адаптивного агрегування моделей та обробки даних забезпечують підвищення точності прийняття рішень в умовах неповноти й нестационарності даних та обмежених обчислювальних ресурсів кінцевих пристроїв.

Практичне значення підтверджується числовими показниками, здобутими під час експериментальних досліджень. Зокрема:

1. Розроблений алгоритм обчислення агрегованих моделей федеративного навчання забезпечує підвищення достовірності прогнозування у задачах регресії, з відповідним зниженням похибки при прогнозуванні енергоспоживання автономних транспортних засобів на 19% при їх функціонуванні у реальному виробничому середовищі.

2. Розроблений алгоритм багатораундного федеративного навчання дає змогу знизити похибку прогнозування агрегованих моделей до 10% залежно від умов функціонування та кількості раундів для навчання.

3. Розроблений алгоритм багатораундного федеративного навчання підвищує енергетичну ефективність процесу федеративного навчання на кінцевих пристроях на 37% при використанні 4 раундів навчання та на 50%, при використанні 8 раундів навчання за умови збереження аналогічної точності прогнозування часових характеристик індустриальної системи.

Отримані результати впроваджено у виробничому процесі ТзОВ «Максітех» де було використано метод федеративного навчання для групи маршрутизаторів, який дозволив покращити точність прогнозування трафіку, що дало змогу підвищити ефективність використання ресурсів та якість сприйняття послуг.

У навчальному процесі кафедри інформаційно-комунікаційних технологій НУ «Львівська політехніка» результати використано для модернізації дисциплін «Інтернет речей та 5G технологій» (магістерський рівень) та «Технології машинного навчання та штучного інтелекту» (бакалаврський рівень), що підтверджено актом впровадження результатів дисертаційної роботи здобувача.

Загальна характеристика дисертаційної роботи. 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 використаних джерел зі 188 найменувань і двох додатків. Загальний обсяг становить 150 сторінок, з яких 102 сторінки основного тексту, 48 рисунків та 12 таблиць.

У вступі представлено загальну характеристику дослідження, обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і завдання роботи, визначено наукову новизну одержаних результатів, їхнє практичне значення, а також висвітлено зв'язок з актуальними науковими програмами, планами і тематиками прикладних досліджень.

У першому розділі здійснено критичний аналіз існуючих наукових підходів, моделей та методів, які забезпечують функціонування інтелектуальних інформаційно-комунікаційних систем автоматизованого управління із використанням парадигми граничних обчислень.

У другому розділі подано формалізацію та опис запропонованих методів і моделей, спрямованих на вдосконалення функціонування інтелектуальних інформаційно-комунікаційних систем у децентралізованому середовищі. Запропоновано метод середньозваженого агрегування параметрів локальних моделей із урахуванням індивідуальної ефективності кожної моделі, а також удосконалено алгоритм багатораундного федеративного навчання з хронологічною стратифікацією навчальної вибірки та поетапним усередненням моделей у процесі ітераційного навчання.

У третьому розділі представлено результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень, проведених на основі телеметричних даних від автономних пристроїв у режимі моделювання. Розглянуто вплив кількості раундів навчання на ефективність моделі. Запропонований підхід до агрегування, в якому ваги локальних моделей визначаються відповідно до їх актуальної прогностичної точності, продемонстрував середнє зниження середньоквадратичної похибки та середньої абсолютної похибки на 19 % порівняно з класичними підходами у федеративному навчанні. Це підтверджує практичну доцільність застосування розробленого методу в індустріальних системах автоматизованого управління.

У четвертому розділі наведено результати експериментальної апробації запропонованого алгоритму на реальній апаратній платформі – автономних мобільних пристроях AGV Formica-1. У процесі натурного експерименту підтверджено ефективність запропонованого багатораундного алгоритму федеративного навчання: енергоспоживання процесу локального тренування зменшено на 37 % при чотирьох раундах та на 50 % при восьми, без погіршення точності прогнозування часових характеристик системи.

У висновку узагальнено наукові та прикладні результати роботи, які в сукупності розв'язують поставлене завдання дисертаційної роботи.

У додатках до роботи подано акти впровадження її результатів, список публікацій здобувача за темою дисертації та апробацію її результатів.

Зауваження та рекомендації до дисертаційної роботи

1. У першому розділі значний обсяг приділено різних теоретичним способам застосування федеративного навчання. Доцільно було б акцентувати увагу саме на методах формування агрегованих моделей федеративного навчання.

2. З опису методу обчислення параметрів агрегованої моделі, шляхом введення додаткового середньозваженого критерію оцінювання ефективності локальних моделей кінцевих пристроїв (параметри m_i та LM_{inf}) не зрозуміло яким чином частота оновлення параметрів впливає на збіжність агрегованої моделі федеративного навчання.

3. Другий розділ дисертаційної роботи містить ряд математичних виразів та посилань на джерела, з які описують принципи функціонування відомих методів федеративного навчання, які доцільніше було б представити у першому розділі дисертаційної роботи.

4. У розділі 4 доцільно було навести приклад реалізації розроблених алгоритмів на різних апаратних платформах, щоб зрозуміти які мінімальні вимоги до апаратних пристроїв для реалізації розроблених автором алгоритмів.

5. Експериментальні дослідження показують лише приклад прогнозування енергетичних параметрів автономних роботизованих систем. Доцільно було б провести аналогічні експерименти для задач класифікації, щоб продемонструвати універсальність розроблених алгоритмів федеративного навчання.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Шубина Богдана Петровича на тему «Методи та моделі побудови інтелектуальних інформаційно-комунікаційних систем автоматизованого управління інфраструктурою» є завершеною науковою працею, яка виконана на високому науково-технічному рівні з дотриманням принципів академічної доброчесності. Наведені зауваження не зменшують значущості отриманих результатів.

У дисертаційній роботі розв'язано наукову задачу 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 важливе 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».

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



Микола БЕШЛЕЙ

Підпис д.т.н., доцента Миколи БЕШЛЕЯ засвідчую
Вчений секретар
Національного університету
«Львівська політехніка»
к.т.н., доцент



Роман БРИЛИНСЬКИЙ