

**ЗАТВЕРДЖУЮ**



Проректор з наукової роботи  
Національного університету  
"Львівська політехніка"

проф.

I.В. Демидов

2025 р.

**Висновок**

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів  
дисертації «Методи та моделі побудови інтелектуальних інформаційно-  
комунікаційних систем автоматизованого управління інфраструктурою»  
здобувача ступеня доктора філософії за спеціальністю**

**122 Комп'ютерні науки**

**(галузь знань 12 Інформаційні технології)**

**Богдана ШУБИНА**

**міжкафедрального наукового семінару Навчально-наукового  
інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій**

### **1. Актуальність теми дисертації**

Поточні тенденції цифрової трансформації, відображені у концепції переходу від Індустрії 4.0 до Індустрії 5.0, активно стимулюють широке впровадження Інтернету речей, периферійних обчислень, штучного інтелекту та автономних роботизованих систем, які в сукупності формують єдину інтелектуальну інформаційно-комунікаційну інфраструктуру, яку можна використати для автоматизації виробничих та невиробничих процесів у різних галузях економіки. За даними провідних міжнародних аналітичних агентств, упродовж останнього десятиліття кількість пристроїв Індустріального Інтернету речей (IIoT), інтегрованих у виробничу або транспортну інфраструктуру, збільшилася більш ніж утричі, а обсяг даних, які генеруються такими пристроями, перевищує сотні петабайт на добу. Це, в свою чергу, спричиняє експоненційне зростання навантаження на канали зв'язку та центри оброблення даних. Аналіз існуючих інформаційно-комунікаційних систем автоматизованого управління свідчить про їх обмежену масштабованість і відмовостійкість при поточних темпах зростання кількості інтелектуальних кінцевих пристроїв та мобільних агентів, таких як автономно-керовані транспортні засоби та безпілотні літальні апарати. Іншим обмежуючим фактором є висока складність розробки інтелектуальних методів автоматизованого управління інфраструктурою, як з точки зору вартості розгортання або оренди надпотужних дата-центрів, так і з точки зору наявності репрезентативних навчальних вибірок даних для навчання нейронних мереж. Додатковим обмеженням при формуванні ефективних навчальних вибірок для інтелектуальних алгоритмів, є політика доступу та обміну даними, зокрема і тими, які містять елементи комерційної таємниці та інтелектуальної власності. Для розв'язку даної проблеми, з'явилась методологія федеративного навчання, яка передбачає децентралізоване навчання на локальних пристроях, з подальшою агрегацією параметрів моделей (ваг або їх градієнтів) у єдину модель, яка синхронізується на всіх пристроях. Такий підхід

забезпечує збереження конфіденційності персональних даних та дає змогу адаптувати моделі до неоднорідних умов середовища.

Вагомий внесок у дослідження систем автоматизованого управління інфраструктурою внесли R. Isermann, J. Lee Серед українських вчених, варто відзначити фахівців, які активно працюють над автоматизованими системами управління індустріальними процесами, серед яких В. Теслюк, І. Цмоць, М. Медиковський; фахівців з машинного навчання та штучного інтелекту: Н. Шаховська, В. Лукін, В. Хавалко, С. Субботін, В. Висоцька, А. Саченко; та фахівців з інформаційно-комунікаційних систем: М. Климаш, І. Демидов, М. Бешлей, О. Шпур. Серед фахівців, що безпосередньо розвивають методи федеративного навчання, варто відзначити вчених Н. В. McMahan, D. Ramage, V. Smith, P. Kairouz, M. Bennis, J. Gazda, M. Dohler.

Проте, в контексті федеративного навчання є ряд протиріч, які ускладнюють його інтеграцію в індустріальних системах. Зокрема, динамічна природа даних ІоТ призводить до того, що навчальні вибірки для окремих локальних агентів не завжди складаються із незалежних ідентично розподілених масивів даних, і відповідно, не гарантують збіжність глобальної моделі. Різні статистичні розподіли локальних агентів, унеможливають ефективне узагальнення особливостей усіх сценаріїв функціонування на рівні агрегованої моделі. Окрім того, обмежені ресурси кінцевих інтелектуальних пристроїв не дають змогу навчати локальні моделі на достатньо великих та інформативних вибірках даних, що в свою чергу обмежує точність агрегованої моделі.

Таким чином, актуальним науковим завданням дисертаційної роботи є розроблення нових та вдосконалення існуючих методів та моделей федеративного машинного навчання для інформаційно-комунікаційних систем автоматизованого управління, з метою підвищення точності прийняття рішень в умовах неповноти й нестаціонарності даних та обмежених обчислювальних ресурсів кінцевих пристроїв.

## **2. Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямами університету та кафедри**

Дисертація виконувалася відповідно до тематичних планів науково-дослідних робіт Національного університету “Львівська політехніка”. Зокрема, в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт «Розроблення новітньої децентралізованої мережі мобільного зв'язку на основі блокчейн-архітектури та штучного інтелекту для впровадження технологій 5G/6G в Україні» (ДБ/Блокчейн), (2020–2022 рр.), № держреєстрації 0120U100674; «Розроблення інноваційних методів та моделей побудови інтелектуальних інформаційно-комунікаційних систем для цифровізації промисловості» (2022–2024 рр.), № держреєстрації 0122U000817; «Розроблення інноваційних методів та засобів розгортання інтелектуальної інформаційної інфраструктури для подвійного використання в умовах цифрової трансформації України (2023–2025 рр.), № держреєстрації 0123U100232. Крім того, дослідження виконувалось в межах програми Norway Grants 2014–2021, що реалізується національним центром досліджень та розвитку Польщі, у рамках проєкту «Автономні транспортні візки, інтегровані з колаборативними роботами для інтелектуальної промисловості» (контракт № NOR/POL-NOR/CoBotAGV/0027/2019-00).

### **3. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів .**

Основний зміст роботи, всі теоретичні та практичні результати, дослідження і висновки, які представлено до захисту, одержані автором особисто. У працях (Додаток Б), опублікованих у співавторстві, внесок Шубина Б.П. є вирішальним, зокрема авторів належать: структурно-функціональна модель інтелектуальної інформаційно-комунікаційної системи на основі федеративного навчання, метод обчислення параметрів агрегованої моделі, метод багатораундного федеративного навчання, методика оцінки енергетичної ефективності кінцевих пристроїв в процесі федеративного навчання, модель інтеграції федеративного навчання на основі хмарних сервісів, моделювання та прогнозування трафіку в інформаційно-комунікаційних системах та мережах мобільного зв'язку.

**4. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій** підтверджуються коректним використанням апробованого математичного апарату, методів моделювання, різними способами виконання розрахунків; використанням даних та програмно-апаратних інтелектуальних роботизованих систем індустріальної інформаційно-комунікаційної системи реального виробництва в рамках співпраці з закордонними навчальними закладами та виробництвами, а також порівняльним аналізом результатів дисертаційних досліджень із даними літературних джерел, результатами задокументованих апробацій.

### **5. Ступінь новизни основних результатів дисертації порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру**

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, які взаємодіють на основі спільного онтологічного ядра, що дало змогу забезпечити 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.

**6. Перелік наукових праць, які відображають основні результати дисертації**  
*Статті у наукових періодичних виданнях інших держав, які включені до наукометричних баз Scopus/Web of Science:*

1. B. Shubyn, D. Kostrzewa, P. Grzesik, P. Benecki, T. Maksymyuk, V. Sunderam, J.-H. Syu, J. C.-W. Lin, and D. Mrozek, "Federated learning for improved prediction of failures in autonomous guided vehicles," *Journal of Computational Science*, p. 101956, 2023.
2. B. Shubyn, D. Mrozek, T. Maksymyuk, V. Sunderam, D. Kostrzewa, P. Grzesik, and P. Benecki, "Federated learning for anomaly detection in industrial IoT-enabled production environment supported by autonomous guided vehicles," *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 13353, 2022, pp. 409–421.
3. T. Maksymyuk, J. Gazda, M. Liyanage, L. Han, B. Shubyn, B. Strykhaliuk, O. Yaremko, M. Jo, and M. Dohler, "AI-enabled blockchain framework for dynamic spectrum management in multi-operator 6G networks," *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 831, 2022, pp. 322–338.
4. A. Luntovskyy, B. Shubyn, T. Maksymyuk, and M. Klymash, "5G slicing and handover scenarios: compulsoriness and machine learning," *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 212, 2021, pp. 223–255.
5. A. Luntovskyy and B. Shubyn, "Energy efficiency for IoT," *Studies in Computational Intelligence*, vol. 976, 2021, pp. 199–215.
6. B. Shubyn, T. Maksymyuk, J. Gazda, B. Rusyn, and D. Mrozek, "Federated learning: A solution for improving anomaly detection accuracy of autonomous guided vehicles in smart manufacturing," *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 1198, 2024, pp. 746–761.
7. A. Luntovskyy, L. Globa, and B. Shubyn, "From big data to smart data: The most effective approaches for data analytics," *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 152, 2021, pp. 23–40.
8. P. Grzesik, P. Benecki, D. Kostrzewa, B. Shubyn, and D. Mrozek, "On-edge aggregation strategies over industrial data produced by autonomous guided vehicles," *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 13353, 2022, pp. 458–471.
9. A. Volovyk, Y. Pyrih, O. Urikova, A. Masiuk, B. Shubyn, and T. Maksymyuk, "Dynamic system state estimation with resilience to observation data anomalies," *Contemporary Mathematics* (Singapore), vol. 5, no. 1, 2024.
10. T. Maksymyuk, J. Gazda, B. Shubyn *et al.*, "Metaverse of Things in 6G era: An emerging fusion of IoT, XR, edge AI and blockchain technologies," *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 965, 2023, pp. 546–564.
11. B. Shubyn, P. Grzesik, T. Maksymyuk, D. Kostrzewa, P. Benecki, J.-H. Syu, J. C.-W. Lin, V. Sunderam, and D. Mrozek, "Resource consumption of federated learning approach applied on edge IoT devices in the AGV environment," in *Computational Science – ICCS 2023*, pp. 492–504, Springer Nature Switzerland, 2023.
12. P. Benecki, D. Kostrzewa *et al.*, "Towards detection of anomalies in automated guided vehicles based on telemetry data," *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 14838, 2024, pp. 192–207.

**Статті у наукових періодичних фахових виданнях України:**

13. Модель інтеграції федеративного навчання в мережі мобільного зв'язку п'ятого покоління. Шубин Б.П., Максимюк Т.А., Яремко О.М., Фабрі Л.П., Мрозек Д. Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія. – 2022. – Т. 2, № 1. – С. 26–35.
14. Метод адаптивного логічного розділення мережі 5G на основі глибокого навчання. Максимюк Т.А., Шубин Б.П., Мисаковець Д.О., Андрущак В.С.,

Думич С.С. Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія «Технічні науки». – 2020. – Т. 31(70), № 5. – С. 36–42.

**Статті у інших наукових періодичних виданнях:**

15. Управління мережами мобільного зв'язку 5G за допомогою використання технологій штучного інтелекту. Шубин Б.П., Климаш М.М., Масюк А.Р., Остапівський А.І. Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія. – 2021. – Т. 1, № 1. – С. 1–10.

**Матеріали Всеукраїнських та міжнародних конференцій:**

16. B. Shubyn, D. Mrozek, L. Fabry, T. Maksymyuk, E. M. Amhoud, and J. Gazda, “Federated learning techniques for 5G mobile networks,” in *Proc. 16th Int. Conf. Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, 2022, pp. 653–657.
17. P. Benecki, D. Kostrzewa, P. Grzesik, B. Shubyn, and D. Mrozek, “Forecasting of energy consumption for anomaly detection in automated guided vehicles: Models and feature selection,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, 2022, pp. 2073–2079.
18. P. Benecki, D. Kostrzewa, P. Grzesik, B. Shubyn, and D. Mrozek, “Optimizing telemetry signal influence for power consumption prediction,” in *Companion Proc. 2023 Genetic and Evolutionary Computation Conf.*, 2023, pp. 51–52.
19. P. Benecki, D. Kostrzewa, P. Grzesik, B. Shubyn, J.-H. Syu, J. C.-W. Lin, V. Sunderam, and D. Mrozek, “Effective prediction of energy consumption in automated guided vehicles with recurrent and convolutional neural networks,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Big Data (BigData)*, 2023, pp. 5024–5030.
20. T. Maksymyuk, N. Lutsiv, B. Shubyn, J. Gazda, and O. Ivakhiv, “Feature engineering for deep learning-based anomaly detection in 5G and beyond,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS)*, 2023, pp. 1110–1113.
21. P. Benecki, D. Kostrzewa, B. Shubyn *et al.*, “Enhancing anomaly detection in automated guided vehicles through feature weight optimization,” in *Companion Proc. 2024 Genetic and Evolutionary Computation Conf. (GECCO)*, 2024, pp. 79–80.
22. A. Luntovskyy and B. Shubyn, “Advanced architectures for IoT scenarios,” in *Proc. Int. Conf. Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, 2020.
23. A. Luntovskyy, B. Shubyn, T. Maksymyuk, and M. Klymash, “Highly-distributed systems: What is inside?” in *Proc. IEEE Conf. Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, 2020, pp. 207–211.
24. A. Luntovskyy, T. Zobjack, B. Shubyn, and M. Klymash, “Energy efficiency and security for IoT scenarios via WSN, RFID and NFC,” in *Proc. IEEE Ukrainian Microwave Conf. (UkrMiCo)*, 2021, pp. 1–6.
25. M. Buchyn, A. Helesh, and B. Shubyn, “Information security during electronic voting: Threats and mechanisms for ensuring,” in *Proc. IEEE 4th Int. Conf. Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, 2021, pp. 266–269, doi: 10.1109/AICT52120.2021.9628971.

**7. Апробація основних результатів дослідження на конференціях, симпозіумах, семінарах тощо**

Основні наукові результати і положення дисертаційної роботи

представлялися та були обговорені на науково-технічних конференціях: International Conference on Computational Science – ICCS (Лондон, Велика Британія – 2022; Прага, Чехія – 2023; Малага, Іспанія – 2024); IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering – TCSET (Славське-Львів, Україна – 2020, 2022, 2024); IEEE International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology – PIC S&T (Харків, Україна – 2020); IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies – AICT (Львів, Україна – 2021); IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics – UkrMiCo (Київ, Україна – 2021); IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics – SMC (Прага, Чехія – 2022); IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems – IDAACS (Дортмунд, Німеччина – 2023); IEEE International Conference on Big Data – BigData (Сорренто, Італія – 2023); ACM Genetic and Evolutionary Computation Conference – GECCO (Лісабон, Португалія – 2023; Мельбурн, Австралія – 2024); International Conference on Smart and Sustainable Technologies – SpliTech (Спліт, Хорватія – 2020), International Conference Infocommunications – Present and Future – IPF (Одеса, Україна – 2020).

## **8. Наукове значення виконаного дослідження із зазначенням можливих наукових галузей та розділів програм навчальних курсів, де можуть бути застосовані отримані результати**

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню наукового завдання розроблення нових та вдосконалення існуючих методів та моделей федеративного машинного навчання для інформаційно-комунікаційних систем автоматизованого управління, з метою підвищення точності прийняття рішень в умовах неповноти й нестационарності даних та обмежених обчислювальних ресурсів кінцевих пристроїв.

Наукове значення роботи полягає у розробленні методу багатораундного федеративного навчання; розробленні структурно-функціональної моделі інтелектуальної інформаційно-комунікаційної системи; удосконаленні методу обчислення параметрів агрегованої моделі федеративного навчання.

Результати дисертаційної роботи використано при формуванні навчальних дисциплін, що викладаються студентам (за навчальним планом) у навчальному процесі кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка», зокрема для студентів спеціальності 126 *Інформаційні системи та технології* в курсах лекцій з дисциплін «Технології машинного навчання та штучного інтелекту» та «Інтернет речей та 5G технології».

## **9. Практична цінність результатів дослідження із зазначенням конкретного підприємства або галузі народного господарства, де вони можуть бути застосовані**

1. Розроблене універсальне програмно-апаратне забезпечення для розгортання інтелектуальної інформаційно-комунікаційної інфраструктури на прикладі реального виробництва має практичну цінність для індустрії за рахунок можливості його використання в широкому спектрі кінцевих пристроїв та галузей застосувань.

2. Розроблений алгоритм обчислення агрегованих моделей федеративного навчання забезпечує підвищення достовірності прогнозування у задачах регресії, що підтверджується зниженням похибки при прогнозуванні енергоспоживання автономних транспортних засобів на 20% при їх функціонуванні у реальному виробничому середовищі.

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

4. 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 при забезпеченні аналогічної похибки прогнозування часових характеристик індустриальної системи.

## **10. Оцінка структури дисертації, її мови та стилю викладення**

Робота складається з переліку умовних скорочень, вступу 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і 2 додатків. Загальний обсяг роботи складає 150 сторінок друкарського тексту, із них 7 сторінок вступу, 102 сторінки основного тексту, 48 рисунків, 5 таблиць, список використаних джерел із 188 найменувань та 2 додатків. Додатки містять акти впровадження результатів дисертаційної роботи та список праць автора.

За структурою, мовою та стилем викладення дисертаційна робота відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України. Загалом дисертаційна робота написана грамотно, технічною мовою. Матеріали досліджень подано логічно, послідовно та доказово.

**У ході обговорення дисертації до неї не було висунуто жодних зауважень щодо самої суті роботи**

**11. З урахуванням зазначеного, на міжкафедральному науковому семінарі Інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій ухвалили:**

**11.1.** Дисертація Шубина Богдана Петровича «Методи та моделі побудови інтелектуальних інформаційно-комунікаційних систем автоматизованого управління інфраструктурою» є завершеною науковою працею, у якій розв'язано конкретну наукову задачу розроблення нових та вдосконалення існуючих методів та моделей федеративного машинного навчання для інформаційно-комунікаційних систем автоматизованого управління, з метою підвищення точності прийняття рішень в умовах неповноти й нестаціонарності даних та обмежених обчислювальних ресурсів кінцевих пристроїв, що має важливе значення для галузі знань 12 Інформаційні технології.

**11.2.** Основні наукові положення, методичні розробки, висновки та практичні рекомендації, викладені у дисертаційній роботі, логічні, послідовні, аргументовані, достовірні, достатньо обґрунтовані. Дисертація характеризується єдністю змісту.

**11.3.** У 25 наукових публікаціях повністю відображені основні результати дисертації, з них 12 статей у науковому періодичному виданні іншої держави, що входить до наукометричних баз Scopus/Web of Science, з яких одна стаття у виданні, яке віднесене до квартилю Q1, 2 статті у наукових фахових виданнях

України, 1 стаття у іншому періодичному виданні, 10 у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій.

**11.4.** Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», 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).

**11.5.** Дисертація є результатом самостійних досліджень, не містить елементів фальсифікації, компіляції, плагіату та запозичень, що констатує відсутність порушення академічної доброчесності. Використання текстів інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела.

**11.6.** З урахуванням наукової зрілості та професійних якостей здобувача вищої освіти ступеня доктора філософії Шубина Богдана Петровича дисертація «Методи та моделі побудови інтелектуальних інформаційно-комунікаційних систем автоматизованого управління інфраструктурою» рекомендується для подання до розгляду та захисту у спеціалізованій вченій раді.

За затвердження висновку проголосували:

|            |           |              |
|------------|-----------|--------------|
| за         | <u>40</u> | <u>сорок</u> |
| проти      | <u>0</u>  | <u>немає</u> |
| утримались | <u>0</u>  | <u>немає</u> |

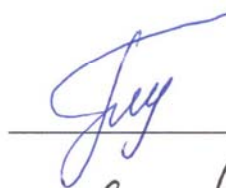
Головуючий на  
засіданні наукового  
семінару, проф. кафедри АСУ  
д.т.н., професор



Іван ЦМОЦЬ

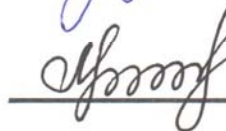
Рецензенти:

д.т.н., доцент, професор  
кафедри ІКТ



Микола БЕШЛЕЙ

к.т.н., доцент кафедри ІКТ



Ольга ШПУР

Відповідальний у ІКНІ за  
атестацію PhD  
к.т.н., доцент, В.о. Директора  
ІКНІ



Віктор ХАВАЛКО

"13" червня 2025 р.