

## РЕЦЕНЗІЯ

кандидата фізико-математичних наук, доцента, доцента кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення **Якименко Наталії Миколаївни** на дисертаційну

роботу **Головатого Артема Олеговича**

на тему «**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ  
МОБІЛЬНИХ МАШИН ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЄЮ ПРОЦЕСІВ ЇХ  
ВИКОРИСТАННЯ НА ПІДПРИЄМСТВІ**»,

що подається на здобуття ступеня доктора філософії

за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування

(галузь знань 13 – Механічна інженерія)

### 1. Актуальність теми дисертації

Ефективність експлуатації та експлуатаційна надійність мобільних машин є визначальним чинником забезпечення стабільної та результативної діяльності підприємств промислового, аграрного, транспортного й комунального секторів. Зростання витрат на технічне обслуговування, підвищення енергоємності виробничих процесів, а також втрата продуктивності внаслідок простоїв, перевантажень і технічних відмов машинного парку зумовлюють необхідність пошуку принципово нових підходів до управління надійністю та ефективністю використання мобільної техніки при реалізації виробничих процесів і систем. При цьому традиційні методи експлуатації, що базуються на регламентних графіках обслуговування, ручному контролі та фрагментарних управлінських рішеннях, характеризуються низькою адаптивністю та обмеженою здатністю реагувати на змінні умови виробничого середовища підприємства.

В умовах цифрової трансформації промисловості актуалізується потреба у комплексному перегляді підходів до організації експлуатації мобільних машин, що передбачає врахування значних обсягів телеметричних даних, поточного технічного стану та режимів функціонування обладнання, структури виробничо-логістичних зв'язків, а також використання засобів автоматизованого аналізу і адаптивного управління. У зв'язку з цим дослідження інтелектуальних моделей експлуатації мобільних машин із

застосуванням методів штучного інтелекту, зокрема графових нейронних мереж, є актуальним як з позицій технічної модернізації, так і з огляду на підвищення економічної ефективності господарської діяльності машинобудівних підприємств.

Інтелектуалізація процесів експлуатації передбачає інтеграцію сенсорних систем, цифрових двійників, алгоритмів машинного навчання та графо-орієнтованих моделей для формування адаптивних, контекстно-залежних режимів роботи мобільних машин і обладнання. Такий підхід забезпечує можливість оперативного виявлення відхилень у роботі техніки в реальному часі, прогнозування технічних несправностей, оптимізації маршрутів переміщення мобільних машин, а також автоматичної корекції їх робочих режимів з урахуванням навантаження, стану елементів графа підприємства та зовнішніх умов експлуатації.

На відміну від класичних методів управління, графові нейронні мережі забезпечують якісно новий рівень ефективності експлуатації мобільних машин, що характеризується підвищеною надійністю, економічністю та здатністю до самоадаптації і самооптимізації. Це створює передумови для більш точного планування ресурсів, зниження рівня аварійності, оптимізації логістичних процесів і загального підвищення результативності виробничої діяльності підприємств. Промислове підприємство, з огляду на велику кількість повторюваних операцій, наявність структурованих телеметричних і логістичних потоків, розвинену технічну інфраструктуру та високі вимоги до ефективності, виступає оптимальним середовищем для апробації, впровадження та масштабування графових моделей у сфері експлуатації мобільної техніки.

Разом з тим ефективне впровадження інтелектуальних систем управління мобільними машинами потребує не лише технічної готовності підприємства, але й належного рівня цифрової культури, кадрового забезпечення та організаційної гнучкості. Важливим чинником є здатність персоналу інтегрувати нові технології у виробничі процеси з використанням даних сенсорних систем, телеметрії та алгоритмів машинного навчання. У сукупності це також підтверджує актуальність дослідження та обґрунтовує доцільність

переходу до інтелектуалізованих моделей експлуатації мобільних машин як одного з ключових напрямів підвищення ефективності сучасних виробничих систем машинобудівних підприємств.

## **2. Зв'язок дисертації з державними науковими програмами, планами, темами та пріоритетними напрямами розвитку науки і техніки**

Дисертаційна робота виконана відповідно до планів науково-дослідних робіт Центральноукраїнського національного технічного університету та пов'язана з науковими темами кафедри експлуатації та ремонту машин. Зокрема, дослідження проводилося в межах наукових тем: «Експлуатаційно-логістичні основи розробки та впровадження інтелектуальних систем технічного сервісу транспортних машин» (№ державної реєстрації та «Підвищення надійності і ефективності системи агропромислового виробництва інтелектуальними та транспортно-логістичними технологіями» (№ державної реєстрації 0121U110833).

Отримані в дисертації результати логічно доповнюють і розвивають напрями зазначених науково-дослідних тем та спрямовані на вирішення актуальних науково-прикладних завдань у сфері експлуатації мобільних машин і впровадження інтелектуальних технологій у виробничі процеси машинобудівних підприємств.

## **3. Наукова новизна одержаних результатів і їх значення для науки та виробництва**

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробленні, теоретичному обґрунтуванні та практичній апробації методу інтелектуалізації процесів експлуатації мобільних машин на виробничому підприємстві, що дозволило розв'язати важливу науково-практичну задачу підвищення показників надійності, ефективності та адаптивності до змінних умов виробничого середовища. У дисертаційній роботі вперше розроблено архітектуру методу управління експлуатацією мобільних машин на основі графових нейронних мереж, адаптовану до умов реального машинобудівного підприємства з урахуванням структури виробничих і логістичних зв'язків, технічного стану машин та режимів їх функціонування, що забезпечує більш

обґрунтоване прийняття управлінських рішень і підвищення показників експлуатаційної надійності. Теоретичними та експериментальними дослідженнями обґрунтовано доцільність створення цифрового двійника мобільної машини як інструменту її самоадаптації та прогнозування технічного стану, що є новим підходом до управління функціонуванням техніки на підприємствах і створює передумови для масштабування та інтеграції запропонованих рішень у виробничі системи різного рівня складності. У роботі удосконалено механізм оптимізації ефективності експлуатації мобільних машин шляхом використання агрегації станів інформації суміжних вузлів графової нейронної мережі, що дозволяє сформувати алгоритм оптимізації режимів роботи техніки та визначити матрицю вагових коефіцієнтів для адаптивного управління з урахуванням навантажень, технічних обмежень і зовнішніх умов експлуатації. Подальшого розвитку набув підхід до формалізації структури підприємства у вигляді графової моделі з множинами вузлів і ребер, який дає змогу математично описати процеси взаємодії мобільних машин, виробничих ліній і логістичних потоків різної природи та забезпечує практичну реалізацію методів графових нейронних мереж у системах управління експлуатацією мобільної техніки.

#### **4. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації**

Обґрунтованість і достовірність наукових положень і висновків дисертаційної роботи забезпечується системним підходом до дослідження процесів експлуатації мобільних машин, коректною постановкою задач та використанням сучасних методів аналізу, моделювання і статистичної обробки експериментальних даних.

Достовірність отриманих результатів підтверджується узгодженістю теоретичних положень із результатами практичних досліджень та апробацією запропонованих рішень в умовах реального виробництва. Результати досліджень представлені у вигляді чітко сформульованих висновків після кожного розділу та узагальнені у загальних висновках дисертації.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та

рекомендацій дисертаційної роботи забезпечуються логічною структурою дослідження, коректною постановкою мети й завдань, застосуванням сучасних методів наукового аналізу, математичного моделювання, комп'ютерного експерименту та апробацією отриманих результатів у виробничих умовах підприємств.

Результати дисертаційної роботи викладені у висновках після кожного розділу, а також у 8 пунктах загальних висновків.

У першому висновку досліджено сучасний стан мобільних машин, їх надійність та ефективність експлуатації на виробничих підприємствах і встановлено, що інтелектуалізація є визначальним глобальним трендом розвитку виробничих систем та інфраструктури; обґрунтовано необхідність систематизації парку мобільних машин як передумови оптимізації їх використання із впровадженням інтелектуальних технологій.

У другому висновку здійснено класифікацію мобільних машин за секторами використання, досліджено їх технічний і функціональний стан та визначено перспективи інтелектуалізації процесів експлуатації; проведено порівняльний аналіз ефективності експлуатації в Україні та провідних країнах світу й встановлено необхідність застосування системного підходу до впровадження інтелектуальних систем і технологій.

У третьому висновку запропоновано універсальний метод оптимізації показників надійності та ефективності використання мобільних машин на основі графової нейронної мережі; сформульовано принципи її функціонування та розроблено алгоритм оптимізації.

У четвертому висновку розроблено підхід до формування графа підприємства як сукупності взаємопов'язаних вузлів (мобільні машини, виробничі лінії, склади, адміністративні елементи тощо) та ребер, що відображають функціональні зв'язки; визначено спосіб опису вузлів через вектори станів і реалізовано дво- та тришарову моделі графової нейронної мережі для порівняльного аналізу.

У п'ятому висновку визначено інтегральні характеристики мобільних машин і елементів виробничої системи (ризик відмов, ефективність,

енергоекономічність, залишковий ресурс) та розроблено підхід до їх прогнозування; запропоновано застосування супервізованого динамічного навчання графової нейронної мережі з адаптацією до реальних умов експлуатації та створено алгоритм його реалізації.

У шостому висновку сформовано теоретичні основи методу графової нейронної мережі, зокрема наведено формальний опис графа підприємства та математичні моделі для дво- і тришарової архітектури; розроблено алгоритм динамічного оновлення вагових коефіцієнтів і доведено його збіжність, а також визначено етапи навчання моделей на виробничих даних.

У сьомому висновку реалізовано запропонований метод на підприємстві ТОВ «АРК ГРУПП» та експериментально підтверджено його ефективність: зменшено простої мобільних машин на 21...29 %, витрати палива – на 11...14 %, частоту відмов – на 27...40 %, витрати на технічне обслуговування – на %, а коефіцієнт готовності підвищено з 0,72 до 0,86; встановлено покращення логістичних показників за рахунок оптимізації маршрутів і навантаження.

У восьмому висновку розроблено практичні рекомендації щодо впровадження методу графової нейронної мережі у виробниче середовище, які включають використання JSON-структур для обміну даними, створення диспетчерського інтерфейсу з графічною візуалізацією та реалізацію механізмів адаптивного навчання на основі даних реального часу.

Загалом достовірність і обґрунтованість результатів дисертації підтверджуються узгодженістю теоретичних і експериментальних досліджень, коректністю застосованих методів, а також практичною спрямованістю отриманих висновків і рекомендацій.

## **5. Повнота відображення результатів дисертації в опублікованих працях**

Результати дисертаційного дослідження відображені у 23 наукових публікаціях, зокрема у 6 статтях у фахових наукових виданнях, одній статті, індексованій у наукометричній базі даних Scopus, 13 матеріалах і тезах доповідей на науково-практичних конференціях, а також у розділах двох

монографій і одного навчального посібника. Кожна робота, опублікована у співавторстві, окремо має уточнення особистого внеску здобувача.

## **6. Відповідність дисертації встановленим вимогам**

Дисертаційна робота складається з анотації на українській та англійській мові, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, що налічує 158 найменувань, а також семи додатків. Основний текст дисертації викладено на 178 сторінках комп'ютерного набору й містить 18 рисунків та 11 таблиць.

Зміст анотацій українською та англійськими мовами відображає зміст дисертації та в достатньому обсязі висвітлює її основні висновки та результати.

У вступі дисертації коректно обґрунтовано актуальність теми дослідження, визначено об'єкт і предмет роботи, сформульовано мету та основні завдання, наведено наукову новизну й практичну значущість отриманих результатів, а також відображено зв'язок роботи з науковими програмами та темами. Структура вступу відповідає встановленим вимогам, а виклад положень є логічним та послідовним.

Перший розділ присвячений аналізу сучасного стану проблеми експлуатації мобільних машин, узагальненню наукових підходів до підвищення їх надійності та ефективності, а також критичному аналізу існуючих методів і моделей управління експлуатаційними процесами. Матеріал розділу систематизовано, що дозволяє аргументовано сформулювати наукову проблему та обґрунтувати необхідність подальших досліджень, що повністю відповідає вимогам до аналітичної частини дисертації.

У другому розділі розроблено методичні та теоретичні основи інтелектуалізації процесів експлуатації мобільних машин із використанням графових нейронних мереж. Коректно сформульовано математичні моделі, наведено архітектуру запропонованих алгоритмів, обґрунтовано прийняті припущення та підходи. Зміст розділу відповідає вимогам до методологічної частини дисертаційної роботи та забезпечує чіткий перехід від теоретичних положень до практичної реалізації.

Третій розділ присвячений експериментальним дослідженням,

моделюванню та аналізу результатів застосування запропонованих методів в умовах виробничого підприємства. У розділі наведено результати обчислювальних експериментів, оцінки ефективності та надійності, виконано порівняльний аналіз з традиційними методами. Отримані результати є логічно узгодженими з теоретичними положеннями попередніх розділів і підтверджують їх достовірність, що відповідає вимогам до експериментально-прикладної частини дисертації.

У четвертому розділі розглянуто питання практичного впровадження результатів дослідження, наведено техніко-економічне обґрунтування ефективності запропонованих рішень, а також сформульовано практичні рекомендації щодо їх використання на підприємствах. Зміст розділу відповідає вимогам до прикладної спрямованості дисертаційних досліджень.

Загальні висновки логічно випливають зі змісту роботи, є науково обґрунтованими, відображають ступінь досягнення поставленої мети та вирішення завдань дослідження. Список використаних джерел та додатки оформлені відповідно до нормативних вимог.

Таким чином, дисертація в повному обсязі відповідає встановленим вимогам щодо структури, змісту та наукового рівня виконання дисертаційних робіт на здобуття ступеня доктора філософії.

**7. Відсутність порушень академічної доброчесності.** За результатами аналізу дисертації та публікацій автора ознак академічного плагіату не виявлено. У тексті дисертації здобувачем наведено посилання на наукові публікації як власні, так і інших авторів. Елементів фальсифікації, фабрикації та запозичень фрагментів тексту, наукових результатів в роботі не виявлено. Це дає можливість зробити висновок про відсутність порушень академічної доброчесності в дисертації.

#### **. Зауваження та дискусійні питання**

За результатами ознайомлення з дисертаційною роботою суттєвих зауважень, які б впливали на загальну позитивну оцінку отриманих результатів, не виявлено. Окремі дискусійні положення мають рекомендаційний характер і можуть бути предметом подальших наукових досліджень.

1. Для підвищення відтворюваності результатів бажано уточнити інтерпретацію осей координат (рис. 1.5, стор. 38), методику побудови та вихідні дані для графіка «динаміки ефективності мобільних машин».

2. У п.п. 1.3, 1.4 є необхідність більш чіткого розкриття взаємозв'язку між зазначеними технологіями, зокрема: механізми інтеграції сенсорних систем з обробка даних у Big Data; використання базових даних у цифрових платформах у межах кіберфізичних систем.

3. Варто доповнити дисертаційну роботу аналізом нормативно-правових аспектів впровадження інтелектуальних систем: стандарти, регулювання, вимоги до безпеки даних.

4. Алгоритм роботи графової нейронної мережі (п. 2.2, розділ 2) описано узагальнено, без наведення формальних рівнянь агрегації та оновлення станів вузлів.

5. Не розглянуто сучасні варіанти агрегації (attention-механізми, GraphSAGE тощо), що могло б підвищити науковий рівень роботи.

6. Алгоритм градієнтного спуску описаний коректно, але не наведено варіантів його реалізації, наприклад, відобразити в Adam, RMSProp тощо.

7. Заповнення відсутніх параметрів в моделях нульовими значеннями може призводити до спотворення результатів, а тому цей факт слід обґрунтувати.

Алгоритм навчання на ретроспективній базі даних підприємства подано покроково, що є перевагою, однак не наведено його псевдокоду або можливо було реалізувати формальний опис.

9. Представлені результати до та після оптимізації є наочними. Слід було вказати обсяг вибірки мобільних машин або кількість спостережень за виробничими процесами.

## **ВИСНОВОК**

Дисертаційна робота на тему «Підвищення ефективності експлуатації мобільних машин інтелектуалізацією процесів їх використання на підприємстві» є завершеною науково-дослідною працею, у якій розв'язано актуальну науково-прикладну задачу підвищення ефективності експлуатації

мобільних машин на основі застосування інтелектуальних методів і моделей управління.

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу, спрямовану на підвищення ефективності функціонування, надійності та ефективності експлуатації мобільних машин за рахунок упровадження інтелектуальних підходів. Отримані результати відповідають сучасним тенденціям розвитку галузевого машинобудування, зокрема процесам цифровізації виробництва та реалізації концепцій Індустрії 4.0.

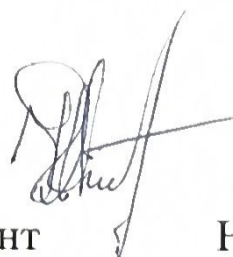
Результати дослідження характеризуються науковою новизною, достатнім рівнем обґрунтованості та практичною значущістю. Вони належним чином висвітлені у наукових публікаціях здобувача, пройшли апробацію на науково-практичних конференціях і підтверджені результатами практичного впровадження.

Дисертаційна робота за змістом, структурою та обсягом відповідає встановленим вимогам, виконана з дотриманням принципів академічної доброчесності та узгоджується з положеннями Постанови Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року (у редакції від 08.05.2024) «Порядок присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії».

Вважаю, що здобувач Головатий Артем Олегович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» (галузь знань 13 «Механічна інженерія»).

Офіційний рецензент:

доцент кафедри кібербезпеки  
та програмного забезпечення,  
кандидат фізико-математичних наук, доцент



Наталія ЯКИМЕНКО

Підпис доц. Якименко Н.М. засвідчую,  
проректор з наукової роботи та  
міжнародних зв'язків  
Центральноукраїнського національного  
технічного університету



Андрій ТИХИЙ