РЕЦЕНЗІЯ

кандидата технічних наук, доцента кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва **Ковальова Юрія Григоровича**, на дисертаційну роботу **Головатого Артема Олеговича**

«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 мобільних машин посідає провідне місце у забезпеченні стабільного, безперервного та економічно доцільного функціонування підприємств промислового, аграрного й комунального секторів. Саме від рівня використання мобільної техніки значною мірою залежать продуктивність виробничих процесів та операцій, собівартість продукції та конкурентоспроможність підприємств у сучасних умовах господарювання. Водночас зростання витрат на технічне обслуговування і ремонт, підвищення енергоємності технологічних процесів, а також суттєві втрати продуктивності, спричинені простоями, нерівномірними навантаженнями й технічними відмовами машинного парку, формують об'єктивну потребу у пошуку та впровадженні принципово нових підходів до управління надійністю та ефективністю використання мобільної техніки.

В умовах цифрової трансформації промисловості та становлення концепцій індустрії 4.0 особливої актуальності набуває необхідність комплексного перегляду підходів до організації експлуатації мобільних машин та самого промислового виробництва Такий перегляд передбачає перехід від реактивного управління до проактивних і прогнозних моделей, що спираються на аналіз великих обсягів телеметричних даних, інформації про поточний технічний стан і режими функціонування обладнання, а також на формалізований опис зв'язків між окремими елементами виробничої системи.

Використання інтелектуальних засобів автоматизованого аналізу та адаптивного управління створює можливості для своєчасного прийняття обґрунтованих управлінських рішень і мінімізації негативного впливу експлуатаційних ризиків.

Інтелектуалізація процесів експлуатації мобільних машин передбачає впровадження комплексної взаємодії сенсорних систем, цифрових двійників, алгоритмів машинного навчання та графових моделей з метою формування адаптивних, контекстно-залежних режимів роботи техніки. Такий підхід дозволяє не лише здійснювати оперативний моніторинг експлуатаційних параметрів у реальному часі, але й прогнозувати виникнення технічних несправностей, оптимізувати маршрути переміщення, коригувати режими навантаження та забезпечувати більш раціональне використання ресурсів залежно від зовнішніх умов експлуатації та внутрішнього стану елементів виробничої системи.

На відміну від класичних методів управління експлуатацією, використання графових нейронних мереж забезпечує якісно новий рівень організації роботи мобільних машин, який характеризується підвищеною надійністю, економічною доцільністю та здатністю до самоадаптації й самооптимізації. Це створює передумови для більш точного планування технічних і енергетичних ресурсів, зниження аварійності, оптимізації виробничих операцій та загального підвищення результативності функціонування машинобудівних підприємств.

Разом з тим результативне впровадження інтелектуальних систем управління мобільними машинами потребує не лише технічної готовності підприємства, а й відповідного рівня цифрової культури, кваліфікованої кадрової підтримки та організаційної гнучкості. Вирішальне значення має здатність персоналу інтегрувати нові технології у виробничі процеси на основі використання даних сенсорних систем, телеметрії та алгоритмів машинного навчання. У сукупності це підтверджує актуальність проведеного дослідження та обґрунтовує доцільність переходу до інтелектуалізованих моделей експлуатації мобільних машин як одного з ключових напрямів підвищення ефективності сучасних виробничих систем.

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

Дисертаційне дослідження виконано згідно з планами науково-дослідної роботи Центральноукраїнського національного технічного університету та безпосередньо пов'язане з науковими напрямами кафедри експлуатації та ремонту машин. Робота проводилася в межах реалізації наукової теми «Експлуатаційно-логістичні основи розробки та впровадження інтелектуальних систем технічного сервісу транспортних машин» (№ державної реєстрації 0119U000615), а також наукової теми «Підвищення надійності і ефективності системи агропромислового виробництва інтелектуальними та транспортно-логістичними технологіями» (№ державної реєстрації 0121U110833).

Наукові результати, отримані в дисертації, є логічним продовженням і розвитком зазначених науково-дослідних тем та спрямовані на розв'язання актуальних науково-прикладних завдань у сфері експлуатації мобільних машин і впровадження інтелектуальних технологій у виробничі процеси підприємств.

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

Полягає у комплексному вирішенні науково-прикладної задачі підвищення ефективності, надійності та адаптивності експлуатації мобільних машин шляхом розроблення, теоретичного обґрунтування та практичної апробації методу інтелектуалізації процесів їх використання в умовах виробничого підприємства. У дисертаційній роботі сформовано новий підхід до управління експлуатацією мобільної техніки на машинобудівному підприємстві, що базується на поєднанні методів штучного інтелекту, графових нейронних мереж і концепції цифрових двійників, який дозволяє перейти від традиційних регламентних та реактивних схем управління до адаптивних, прогнозних і самооптимізованих моделей функціонування машинного парку.

Вперше розроблено архітектуру методу управління експлуатацією мобільних машин на основі графових нейронних мереж, адаптовану до умов реального машинобудівного підприємства з урахуванням структури виробничо-логістичних зв'язків, технічного стану машин, режимів їх роботи та взаємодії між елементами виробничої системи. Запропонована архітектура забезпечує

формування більш обґрунтованих управлінських рішень, підвищення експлуатаційної надійності техніки та раціональніше використання ресурсів, що має важливе теоретичне значення для розвитку методів експлуатації машин і практичну цінність для підприємств різних галузей.

Теоретичними та експериментальними дослідженнями обґрунтовано доцільність створення цифрового двійника мобільної машини як інструменту її самоадаптації та прогнозування технічного стану в процесі експлуатації. Такий підхід формує новий рівень управління функціонуванням мобільної техніки, дозволяючи не лише ідентифікувати поточні відхилення у роботі машини, але й прогнозувати можливі відмови, оптимізувати режими навантаження та знижувати ризики аварійних зупинок. Це створює передумови для масштабування та інтеграції запропонованих рішень у сучасні виробничі системи, науково підтримує розвиток концепції Індустрії 4.0 та цифрових виробництв.

У роботі подальшого розвитку набув механізм оптимізації ефективності експлуатації мобільних машин шляхом використання агрегації станів інформації суміжних вузлів графової нейронної мережі, що дозволяє формувати алгоритми оптимізації режимів роботи техніки та визначати матриці вагових коефіцієнтів для адаптивного управління з урахуванням технологічних навантажень, технічних обмежень і зовнішніх умов експлуатації. Це розширює можливості математичного апарату експлуатації машин і забезпечує практичну реалізацію інтелектуальних методів у системах управління.

Подальшого розвитку також набув підхід до формалізації структури підприємства у вигляді графової моделі з використанням множин вузлів і ребер, що дає змогу математично описати процеси взаємодії мобільних машин, виробничих дільниць і логістичних потоків. Запропонована модель створює теоретичне підґрунтя для практичного застосування графових нейронних мереж у задачах управління експлуатацією мобільної техніки та має значний потенціал для використання у промислових, аграрних та транспортних підприємств.

4. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

Обґрунтованість наукових положень і висновків дисертаційної роботи

забезпечується використанням системного підходу до дослідження процесів експлуатації мобільних машин, коректною постановкою наукових задач, а також застосуванням сучасних методів аналізу, математичного моделювання та статистичної обробки експериментальних даних. Достовірність отриманих результатів підтверджується узгодженістю теоретичних положень із результатами практичних і експериментальних досліджень, а також апробацією запропонованих рішень в умовах реального виробництва. Основні результати роботи послідовно відображені у висновках до кожного розділу та узагальнені у загальних висновках дисертації.

Загальна обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації також забезпечуються логічною структурою дослідження, чітким формулюванням мети та завдань, послідовним викладенням матеріалу, використанням сучасного наукового апарату, методів математичного моделювання, комп'ютерного експерименту та перевіркою отриманих результатів у виробничих умовах.

У першому висновку в результаті проведеного аналізу сучасного стану мобільних машин, показників надійності та ефективності їх експлуатації на виробничих підприємствах встановлено, що інтелектуалізація є визначальним глобальним трендом розвитку виробничих систем та інфраструктури. Обґрунтовано, що багатофункціональність парку мобільних машин зумовлює необхідність його систематизації, що створює передумови для розв'язання задач оптимізації експлуатації із застосуванням інтелектуальних технологій.

У другому висновку сформовано класифікацію мобільних машин за секторами їх використання, визначено їх технічний і функціональний стан, а також окреслено перспективи інтелектуалізації експлуатаційних процесів на підприємствах. Виконано порівняльний аналіз ефективності експлуатації мобільних машин в Україні та провідних країнах світу, що дозволило виявити ключові тенденції розвитку та обґрунтувати необхідність застосування системного підходу до впровадження інтелектуальних систем і технологій.

У третьому висновку розроблено універсальний метод використання графових нейронних мереж для оптимізації показників надійності та ефективності експлуатації мобільних машин у виробничих умовах.

Сформульовано загальні принципи функціонування графової нейронної мережі та запропоновано алгоритм оптимізації відповідних показників.

В четвертому висновку запропоновано підхід до формування графової моделі підприємства на основі сукупності вузлів (мобільні машини, виробничі лінії, парк машин, склади, адміністративні елементи, зовнішні регулятори тощо) та ребер, що відображають функціональні зв'язки між ними. Опис вузлів здійснено за допомогою векторів стану, які інтегрують ключові експлуатаційні параметри. Для оцінювання результатів оптимізації застосовано двошарові та тришарові архітектури графових нейронних мереж.

В п'ятому висновку визначено інтегральні характеристики мобільних машин і елементів виробничої системи, зокрема ризик відмов, ефективність (продуктивність), енергоекономічність та залишковий ресурс. Розроблено підхід до їх прогнозування на основі графових нейронних мереж із використанням супервізованого динамічного навчання, що забезпечує адаптацію моделі до реальних умов експлуатації, а також запропоновано алгоритм його реалізації.

В шостому висновку сформовано теоретичні засади методу графових нейронних мереж, включаючи формалізацію графа підприємства та його математичний опис для дво- і тришарових архітектур. Удосконалено підхід до супервізованого навчання шляхом використання вектора-вчителя та функції витрат. Розроблено алгоритм динамічного оновлення вагових коефіцієнтів і доведено його збіжність. Визначено послідовність етапів навчання моделей на основі виробничих даних після побудови та нормалізації графа.

В сьомому висновку здійснено практичну реалізацію запропонованого методу графових нейронних мереж для оптимізації експлуатації мобільних машин у виробничій системі підприємства ТОВ «АРК ГРУПП». Експериментальні результати підтвердили ефективність методу: зменшення простоїв на 21...29%, зниження витрат палива на 11...14%, підвищення коефіцієнта готовності з 0,72 до 0,86, зменшення частоти відмов на 27...40% та скорочення витрат на технічне обслуговування на 12...16%. Візуалізація оптимізованих маршрутів у графовій формі засвідчила зниження дублювання маршрутів, більш рівномірний розподіл навантаження та скорочення часу доставки.

У восьмому висновку розроблено практичні рекомендації щодо інтеграції методу графових нейронних мереж у виробничі системи, зокрема щодо використання JSON-структур для обміну даними, створення диспетчерських інтерфейсів із графічною візуалізацією та впровадження механізмів адаптивного навчання на основі даних реального часу.

Загалом результати дослідження підтвердили доцільність і перспективність застосування графових нейронних мереж у виробничих системах, оскільки вони забезпечують підвищення ефективності експлуатації, зниження витрат і формують підґрунтя для цифрової трансформації управління мобільними машинами. Доведено універсальність запропонованого підходу та можливість його масштабування на інші галузі, зокрема аграрні, промислові та логістичні підприємства з розвиненим парком мобільних машин.

5. Повнота відображення результатів дисертації в опублікованих працях

Основні результати дисертаційного дослідження отримали відображення у 23 наукових працях, у тому числі у шести статтях, опублікованих у фахових наукових виданнях, одній статті, проіндексованій у наукометричній базі даних Scopus, тринадцяти матеріалах і тезах доповідей на науково-практичних конференціях, а також у розділах двох монографій і одного навчального посібника.

6. Відповідність змісту дисертації встановленим вимогам

Дисертаційна робота характеризується логічно впорядкованою, цілісною та науково обґрунтованою структурою. Вона включає анотацію двома мовами, вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел з 158 найменувань, 7 додатків. Основний зміст роботи викладено на 178 сторінках машинописного тексту та доповнено 18 рисунками і 11 таблицями, що сприяє підвищенню наочності, обґрунтованості та повноти представлення результатів дослідження.

Дисертаційна робота на тему «Підвищення ефективності експлуатації мобільних машин інтелектуалізацією процесів їх використання на підприємстві» за своєю структурою, змістовним наповненням і логікою викладення матеріалу повністю відповідає чинним нормативним вимогам, що

висуваються до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії, а також сучасним вимогам до наукових досліджень прикладного спрямування у галузі машинобудування та експлуатації техніки.

В анотації двома мовами дано стислий, структурований виклад змісту дослідження, який відображає його наукову сутність, результати та значущість.

У вступі дисертації належним чином обґрунтовано актуальність обраної теми дослідження, що підтверджується сучасним станом розвитку виробничих і логістичних систем та необхідністю впровадження інтелектуальних технологій у процеси експлуатації мобільних машин. Чітко визначено об'єкт і предмет дослідження, сформульовано мету та комплекс завдань, які логічно взаємопов'язані та спрямовані на її досягнення. У вступі також відображено наукову новизну і практичну значущість отриманих результатів, наведено зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами і темами, що відповідає встановленим вимогам до структури вступної частини дисертацій.

Перший розділ дисертації присвячений аналізу сучасного стану проблеми експлуатації мобільних машин, узагальненню існуючих наукових підходів до підвищення їх надійності та ефективності, а також критичному аналізу методів і моделей управління експлуатаційними процесами. Матеріал розділу систематизовано з урахуванням логіки розвитку наукової проблематики, що дозволило коректно сформулювати наукову проблему, виявити невирішені аспекти та аргументовано обґрунтувати необхідність подальших досліджень. Зміст першого розділу цілком відповідає вимогам до аналітичної частини дисертаційної роботи.

У другому розділі викладено теоретичні й методичні основи інтелектуалізації процесів експлуатації мобільних машин із використанням графових нейронних мереж. У розділі коректно сформульовано математичні моделі, наведено архітектуру запропонованих алгоритмів, обґрунтовано використані припущення та підходи до формалізації виробничих процесів. Матеріал подано послідовно, з чітким переходом від теоретичних положень до можливостей їх практичної реалізації, що відповідає вимогам до методологічної та теоретичної частини дисертаційних досліджень.

Третій розділ присвячено експериментальним дослідженням,

комп'ютерному моделюванню та аналізу результатів застосування запропонованих методів у умовах реального виробничого підприємства. У розділі наведено результати обчислювальних експериментів, виконано оцінювання показників ефективності та надійності експлуатації мобільних машин, а також здійснено порівняльний аналіз із традиційними методами управління. Отримані результати є логічно узгодженими з теоретичними положеннями попередніх розділів, підтверджують їх достовірність і відповідають вимогам до експериментально-прикладної частини дисертаційної роботи.

У четвертому розділі розглянуто питання практичного впровадження результатів дослідження, наведено техніко-економічне обґрунтування ефективності запропонованих інтелектуалізованих рішень, а також сформульовано практичні рекомендації щодо їх використання на виробничих підприємствах. Зміст розділу спрямований на демонстрацію прикладної цінності дисертаційної роботи й відповідає вимогам до практичної спрямованості наукових досліджень.

Загальні висновки є науково обґрунтованими, логічно випливають зі змісту дисертаційної роботи, узагальнюють основні результати дослідження та відображають ступінь досягнення поставленої мети й вирішення визначених завдань. Список використаних джерел і додатки оформлено відповідно до чинних нормативних вимог.

7. Зауваження та дискусійні питання

1. Доцільно розширити аналіз аспектів надійності, ремонтопридатності та технічної діагностики мобільних машин як ключових чинників ефективності їх експлуатації.

2. Подані технології (сенсорні системи, телеметрія, IoT, Big Data, цифрові платформи) (п.п. 1.3, 1.4), доцільно структуризувати за різними рівнями ознакам: база даних, передача та обробка інформації, прийняття рішень.

3. Опис технічних проблем (зношеність, низька надійність та ефективність, відсутність сенсорів та ін.) пов'язаних зі технічним станом та функціонуванням мобільних машин потребує деталізації з урахуванням типів машин, умов експлуатації та рівня їх технологічної готовності.

4. Порівняльна таблиця 3.1, стор. 104, є корисною, однак оцінки складності наведено узагальнено без виведення.

5. В роботі вектор-вчитель визначено коректно, однак не достатньо повно розглянуто випадки неповних або шумових даних. Процедура формування векторів-вчителів описана змістовно, в той час не визначено точність цих «еталонних» значень для даного виробничого підприємства.

6. Загалом розділ 3 має високий теоретичний рівень і добре структурований, однак потребує підсилення експериментальною верифікацією та більш глибоким обґрунтуванням окремих рішень.

7. Архітектури дво- та тришарової графової нейронної мережі описані достатньо детально, однак не наведено обґрунтування вибору саме розмірності прихованих шарів (7→16→7).

8. Отримані результати оптимізації є переконливими, в той час слід було навести результати статистичної перевірки їх значущості.

За результатами аналізу дисертаційної роботи суттєвих зауважень, які могли б вплинути на загальну позитивну оцінку отриманих результатів, не встановлено. Водночас окремі положення мають дискусійний характер, носять рекомендаційний зміст і можуть слугувати підґрунтям для подальших наукових досліджень.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота здобувача Головатого Артема Олеговича на тему «Підвищення ефективності експлуатації мобільних машин інтелектуалізацією процесів їх використання на підприємстві» є завершеним, цілісним і науково обґрунтованим дослідженням, виконаним на високому теоретичному та методичному рівні. У роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу підвищення надійності, ефективності та адаптивності експлуатації мобільних машин шляхом застосування сучасних інтелектуальних методів і моделей управління, що відповідає сучасним тенденціям цифрової трансформації промисловості та розвитку інтелектуальних виробничих систем.

У дисертації сформульовано і науково обґрунтовано новий підхід до управління процесами експлуатації мобільної техніки, який базується на використанні методів штучного інтелекту, графових нейронних мереж і

концепції цифрових двійників. Отримані результати відзначаються науковою новизною, достовірністю та практичною значущістю, а також мають потенціал подальшого розвитку й впровадження в умовах промислових, агропромислових і транспортно-логістичних підприємств. Запропоновані в роботі наукові положення, висновки та рекомендації є логічно узгодженими, методично коректними та підтвердженими результатами теоретичних і експериментальних досліджень.

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».

З урахуванням викладеного, дисертаційна робота повністю відповідає вимогам чинних нормативних документів Міністерства освіти і науки України щодо підготовки та атестації здобувачів ступеня доктора філософії, а її автор Головатий Артем Олегович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування.

Офіційний рецензент:
доцент кафедри матеріалознавства
та ливарного виробництва
Центральноукраїнського національного
технічного університету,
кандидат технічних, доцент Юрій КОВАЛЬОВ

Підпис доц. Ковальов Ю.Г. засвідчую,
проректор з наукової роботи та
міжнародних зв'язків Андрій ТИХИЙ