

ВІДГУК

офіційного опонента декана факультету конструювання та дизайну Національного університету біоресурсів і природокористування України, доктора технічних наук, професора **РОГОВСЬКОГО Івана Леонідовича** на дисертацію **ГОЛОВАТОГО Артема Олеговича** на тему: «Підвищення ефективності експлуатації мобільних машин інтелектуалізацією процесів їх використання на підприємстві», подану на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» галузі знань 13 «Механічна інженерія»

Актуальність обраної теми

Актуальність дисертаційного дослідження ГОЛОВАТОГО Артема Олеговича визначається сучасними тенденціями розвитку машинобудування, що перебуває у фазі цифрової трансформації відповідно до концепції Індустрії 4.0. Експлуатаційна ефективність мобільних машин є ключовим чинником стабільності та конкурентоспроможності підприємств промислового, аграрного та транспортних секторів економіки. Зростання витрат на технічне обслуговування, необхідність зниження енергоємності виробничих процесів та підвищення експлуатаційної надійності мобільних машин обумовлюють потребу у впровадженні інтелектуальних систем управління.

Обрана тема дисертації відповідає спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» галузі знань 13 «Механічна інженерія», оскільки поєднує класичні напрями галузі – конструювання, експлуатацію та надійність машин – із сучасними цифровими технологіями. Використання графових нейронних мереж та концепції цифрових двійників забезпечує якісно новий рівень управління рівнем надійності та ефективності мобільних машин, що дозволяє реалізувати адаптивні режими роботи, прогнозувати технічні відмови та оптимізувати виробничі процеси. Це відповідає стратегічним завданням Індустрії 4.0 та трансформації спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» галузі знань 13 «Механічна інженерія» у напрямі інтеграції штучного інтелекту, сенсорних систем та

автоматизованого аналізу даних технічного стану та показників надійності і ефективності експлуатації мобільних машин.

Дисертаційна робота має високу актуальність, відповідає сучасним науковим і практичним потребам та забезпечує розвиток спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» галузі знань 13 «Механічна інженерія» у контексті цифрової інженерії та інтелектуалізації виробничих систем на машинобудівному підприємстві.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами

Робота виконана згідно з планами науково-дослідних робіт Центральноукраїнського національного технічного університету в рамках наукової теми кафедри експлуатації та ремонту машин «Експлуатаційно-логістичні основи розробки та впровадження інтелектуальних систем технічного сервісу транспортних машин» (№ держ. реєстрації 0119U000615), «Підвищення надійності і ефективності системи агропромислового виробництва інтелектуальними та транспортно-логістичними технологіями» (№ держ. реєстрації 0121U110833).

Ступінь обґрунтованості наукових положень

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, наведених у дисертаційній роботі, є достатньо високим і забезпечується системним поєднанням теоретичних та експериментальних досліджень з використанням програмного забезпечення, виконаних з дотриманням сучасних наукових підходів і вимог.

Досягнутий рівень обґрунтованості забезпечено застосуванням сучасного інструментарію досліджень, який охоплює системний підхід до аналізу показників надійності та ефективності експлуатації мобільних машин, використання математичних і алгоритмічних моделей, моделювання виробничих процесів за допомогою графових структур, а також інтеграцію графових нейронних мереж із концепцією цифрових двійників. Обраний підхід відповідає актуальним напрямкам розвитку спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» галузі знань 13 «Механічна інженерія» і відображає ключові вимоги Індустрії 4.0, де визначальними є цифровізація та інтелектуалізація систем управління.

В теоретичних положеннях дисертації обґрунтовується визначення графу підприємства, матриці та вектори вузлів та функціонування зв'язків, дано математичний опис графової нейронної мережі та запропонованих варіантів функцій агрегації та трансформації для виробничих систем, побудовано дво- та тришарову моделі, алгоритми реалізації, навчання моделей на виробничій базі даних.

Переконливість результатів зумовлена чітким формулюванням мети та завдань дослідження, їхньою узгодженістю з отриманими висновками, а також адекватністю застосованих моделей реальним умовам функціонування мобільних машин у виробничому середовищі. Вагомим підтвердженням є впровадження розроблених рішень на практиці, що дозволило продемонструвати їхню ефективність і доцільність використання в процесах цифрової модернізації виробництва.

Результати дисертаційної роботи характеризуються високим рівнем наукової достовірності, методичною виваженістю та значною практичною цінністю для розвитку галузевого машинобудування в умовах сучасних технологічних змін.

Достовірність отриманих результатів

Результати, отримані в межах дисертаційного дослідження, характеризуються високим ступенем достовірності і надійності, що зумовлено чітко вибудованою методологією, обґрунтованим використанням сучасних методів аналізу та моделювання виробничої системи машинобудівного підприємства, а також логічною узгодженістю між теоретичними положеннями і сформульованими висновками.

Запропоновані математичні моделі та алгоритми адекватно відтворюють реальні процеси функціонування мобільних машин у виробничому середовищі, з урахуванням їх взаємозв'язків, технічного стану та особливостей його динаміки.

Достовірність результатів підтверджена проведенням комп'ютерного моделювання та серії обчислювальних експериментів, виконаних із використанням реальних або максимально наближених до реальних експлуатаційних даних мобільних машин на виробничих системах підприємств. Отримані показники

ефективності та надійності демонструють відтворюваність, стійкість до варіацій початкових параметрів ретроспективних баз даних і узгоджуються з теоретичними положеннями запропонованого підходу дослідження з використанням методу і побудованим моделям графової нейронної мережі.

Суттєвим підтвердженням достовірності є практичне впровадження розроблених підходів у виробничу діяльність підприємств ТОВ «Ремсинтез», ТОВ «АРК ГРУПП» та ТОВ АГРОПРОМИСЛОВА КОМПАНІЯ «ФАВОРИТ». Результати апробації засвідчили їхню ефективність, працездатність та можливість застосування в реальних умовах функціонування виробничих систем машинобудівних підприємств.

Додатково наукова достовірність і надійність результатів підтверджується їх апробацією на міжнародних наукових конференціях, а також публікацією у фахових наукових виданнях України та міжнародній науково-метричній базі Scopus, що свідчить про відповідність отриманих результатів сучасним вимогам до досліджень у галузі машинобудування. Сукупність зазначених факторів визначає про високий рівень достовірності отриманих у роботі наукових результатів і обґрунтування зроблених висновків.

Наукова новизна результатів досліджень

Наукова новизна дисертації полягає у розробленні, теоретичному обґрунтуванні та практичній апробації нового інтегрованого підходу до інтелектуалізації процесів експлуатації мобільних машин у виробничих умовах, що відповідає сучасним тенденціям розвитку спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» галузі знань 13 «Механічна інженерія» в концепції Індустрії 4.0. Запропоновані рішення ґрунтуються на застосуванні методів штучного інтелекту, зокрема графових нейронних мереж, а також технології цифрових двійників, що забезпечує перехід від традиційних регламентних методів експлуатації до адаптивних, самонавчальних систем управління виробничою системою на машинобудівному підприємстві.

Вперше розроблено та науково обґрунтовано архітектуру методу управління експлуатацією мобільних машин на основі графових нейронних мереж, адаптовану

до умов реального виробничого підприємства. Запропонована архітектура дозволяє формалізувати взаємодію між мобільними машинами, виробничими дільницями, технологічними маршрутами та іншими елементами виробничої системи у вигляді єдиної графової моделі. Це створює передумови для побудови адаптивних алгоритмів управління та підтримки прийняття рішень у цифровому виробничому середовищі на машинобудівному підприємстві.

Науково обґрунтовано доцільність створення цифрового двійника мобільної машини як інструменту прогнозування технічного стану, оцінювання експлуатаційних ризиків і реалізації механізмів самоадаптації режимів її функціонування. Такий підхід відповідає сучасним вимогам концепції Індустрії 4.0, де ключовим є використання телеметрії, сенсорних систем та алгоритмів машинного навчання для забезпечення безперервності й ефективності виробничих процесів.

Подальшого розвитку набули методичні підходи до оптимізації ефективності експлуатації мобільних машин шляхом використання механізмів агрегації інформації про стани суміжних вузлів графової нейронної мережі і функціональних зв'язків між ними. Це дозволило сформулювати алгоритми адаптивного управління, що узгоджено враховують як локальні, так і глобальні характеристики виробничої системи, визначають матриці вагових коефіцієнтів з урахуванням експлуатаційних навантажень, технічних обмежень і впливу зовнішніх умов. Одержані результати розширюють сучасні уявлення про можливості застосування інтелектуальних графових моделей у задачах експлуатації мобільної техніки та мають суттєве значення для розвитку теорії і практики управління виробничими системами на машинобудівному підприємстві.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертація характеризується логічною послідовністю викладення матеріалу, чіткістю формулювань та аргументованістю висновків, викладена державною мовою з дотриманням норм наукового стилю. Використаний у роботі термінологічний апарат відповідає сучасним стандартам технічних наук з галузевого машинобудування. Структура дисертації є виваженою, а обсяг окремих

розділів узгоджується з їх змістовним наповненням. Ілюстративний матеріал (схеми, діаграми, таблиці) органічно доповнює текстову частину роботи та сприяє кращому сприйняттю запропонованих підходів і результатів дослідження. Дисертація оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 року № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та повністю відповідає принципам академічної доброчесності. Отже, робота характеризується завершеністю, культурою наукового викладу й відповідає критеріям кваліфікаційної праці на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування». Повнота викладення результатів дисертації в наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації, відсутність порушення академічної доброчесності

Повнота викладу наукових положень в опублікованих працях

Основні результати дослідження, включно з науковими положеннями, висновками та практичними рекомендаціями, знайшли належне відображення у публікаціях автора, загальна кількість яких становить 23 наукові праці. Серед них – шість статей у фахових виданнях України, одна стаття, індексована у міжнародній базі Scopus, тринадцять матеріалів і тез доповідей, опублікованих за результатами участі у міжнародних конференціях, а також розділи у двох монографіях і одному навчальному посібнику. Такий обсяг і різноманітність публікацій відповідають сучасним вимогам до дисертаційних робіт та забезпечують належну апробацію отриманих результатів.

У наукових публікаціях автора всебічно представлено новизну запропонованих рішень, детально викладено основні теоретичні положення, алгоритми та математичні моделі, що відповідають сучасному рівню розвитку спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» в умовах цифрової трансформації виробництва. Особливу вагу має стаття, опублікована у виданні, індексованому в базі Scopus, яка підтверджує відповідність отриманих результатів міжнародним стандартам досліджень у сфері інтелектуалізації виробничих процесів та застосування методів штучного інтелекту. Це засвідчує високий рівень наукової достовірності та значущості виконаної роботи.

Представлені на міжнародних конференціях, матеріали та тези доповідей, відображають процес апробації дисертаційних положень, висвітлюють дискусійні аспекти дослідження та підтверджують їх практичну цінність. Включення окремих результатів у розділи монографій та навчального посібника сприяє поширенню здобутих знань у науковому та освітньому середовищі, що відповідає завданням Індустрії 4.0 щодо інтеграції новітніх підходів у навчальний процес і практику підготовки фахівців.

Загалом кількість і зміст опублікованих праць забезпечують повне висвітлення основних результатів дисертаційного дослідження, підтверджують їх наукову апробацію та демонструють можливість практичного застосування. Практична значущість опублікованих матеріалів полягає у тому, що розроблені моделі та алгоритми можуть бути використані підприємствами для підвищення ефективності й надійності експлуатації мобільних машин, оптимізації виробничих процесів та підтримки прийняття управлінських рішень у цифровому виробничому середовищі.

Перевірка на академічний плагіат та аналіз текстів публікацій не виявили порушень академічної доброчесності. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів супроводжується посиланнями на відповідні джерела. У роботі відсутнє привласнення чужих ідей, результатів або слів без оформлення належного цитування. Враховуючи означене вище, можна стверджувати про відсутність порушень норм академічної доброчесності.

Аналіз змісту дисертації

Зміст та побудова дисертаційної роботи відображають її внутрішню узгодженість та завершеність, і системний характер вирішення поставленої науково-практичної задачі підвищення показників надійності та ефективності мобільних машин на машинобудівних підприємств. Матеріал викладено логічно й послідовно, що забезпечує цілісність дослідження та чітке розкриття його основних положень. Робота відповідає встановленим вимогам до дисертаційних досліджень на здобуття ступеня доктора філософії, характеризується продуманою структурою, взаємозв'язком окремих частин та їх підпорядкованістю досягненню визначеної

мети. Композиція дисертації, яка включає вступ, чотири змістовні розділи, узагальнені висновки, список використаних джерел та додатки, забезпечує всебічне й повне висвітлення результатів проведеного наукового дослідження.

У вступі дисертації всебічно обґрунтовано актуальність теми, яка визначається сучасними вимогами у сфері експлуатації мобільних машин та необхідністю впровадження інтелектуальних методів управління у виробничих системах машинобудівних підприємств. Чітко сформульовано об'єкт і предмет дослідження, визначено мету та комплекс взаємопов'язаних завдань, реалізація яких забезпечує її досягнення. Вступ належним чином висвітлює наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, обґрунтовує їх теоретичну й прикладну цінність, а також показує зв'язок дисертації з науковими програмами кафедри, що відповідає сучасним трансформаціям спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» у контексті концепції Індустрії 4.0.

Перший розділ виконує аналітичну функцію: здійснено ґрунтовний аналіз сучасного стану та класифікацію мобільних машин, їх перспектив інтелектуалізації в експлуатації. Класифікацію мобільних машин систематизовано як основу оцінки технічного та функціонального їх стану, проаналізовано рівень надійності й ефективності експлуатації, розглянуто сучасні технології інтелектуалізації виробництва та відображено досвід інтеграції інтелектуальних систем. Виявлені проблемні аспекти інтеграції інтелектуалізованих рішень логічно підводять до формулювання мети та завдань дослідження.

Другий розділ присвячено розробленню узагальненого методу застосування графових нейронних мереж для оптимізації ефективності використання мобільних машин на машинобудівному підприємстві. У ньому розкрито принципи функціонування графових нейронних мереж, описано механізм роботи мережі в задачах оптимізації, відображено формування графа підприємства, вибір архітектури графової нейронної мережі та особливості супервізованого навчання. Значну увагу приділено порівнянню дво- та тришарових архітектур, що відповідає сучасним підходам Індустрії 4.0 до побудови адаптивних моделей управління, виробничими процесами на машинобудівному підприємстві.

Третій розділ має теоретичний характер: наведено формалізовані визначення графа підприємства, математичний опис механізмів графової нейронної мережі, моделі для різних архітектур, функції витрат і вектори навчання. Розглянуто динамічне оновлення вагових коефіцієнтів та збіжність алгоритму, що свідчить про глибину теоретичного опрацювання та відповідність сучасним вимогам до цифрових методів моделювання у машинобудуванні.

Четвертий розділ має прикладну спрямованість і демонструє практичну реалізацію розробленого методу на підприємстві ТОВ «АРК ГРУПП». Описано процес формування графової моделі підприємства, архітектуру нейронної мережі та наведено постановку і реалізацію задачі оптимізації. Представлено результати впровадження запропонованого методу та їх аналіз, що підтверджує ефективність застосування інтелектуалізованих підходів у реальних виробничих умовах.

У підсумкових висновках систематизовано основні результати дослідження, сформульовано ключові положення та окреслено рівень досягнення поставленої мети й виконання визначених завдань. Структура та логіка викладу матеріалу забезпечують цілісне й послідовне представлення отриманих результатів, що підтверджує завершеність роботи та її наукову обґрунтованість. Зміст дисертації відповідає сучасним вимогам до кваліфікаційних досліджень за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» та відображає актуальні тенденції цифрової трансформації виробничих систем.

Ідентичність змісту анотацій та основних положень дисертації

Анотації українською та англійською мовами відображають основні результати та висновки роботи, що забезпечує їх відповідність змісту дисертації.

Відсутність порушень академічної доброчесності

За результатами аналізу тексту дисертації та публікацій автора ознак академічного плагіату не виявлено. У роботі коректно наведено посилання на власні праці та публікації інших авторів із дотриманням вимог академічного цитування. Фактів фальсифікації чи неправомірних запозичень не встановлено, що підтверджує виконання роботи з дотриманням принципів академічної доброчесності.

Зауваження та пропозиції до дисертації.

Відзначаючи належний науково-теоретичний рівень дисертації та достатню обґрунтованість отриманих результатів, вважаю за необхідне висловити низку зауважень і міркувань дискусійного характеру.

1. У роботі доцільно більш детально обґрунтувати вибір категорій мобільних машин, а також розглянути можливість використання альтернативних класифікаційних ознак (за типом приводу, рівнем автоматизації, функціональним призначенням, умовами експлуатації тощо).

2. У розділі 1, п.1.3, показано технічні переваги інтелектуалізації процесів експлуатації мобільних машин у виробничій системі машинобудівних підприємств. Бажано було більш детально висвітлити її різні аспекти, в т.ч. і економічні: розрахунок економії ресурсів, зниження витрат на технічне обслуговування, підвищення продуктивності.

3. У розділі 1, п.1.4, наведено зарубіжний досвід використання елементів інтелектуалізації у виробничих системах підприємств, однак доцільно було б ширше порівняти результати дослідження з міжнародними практиками застосування методів штучного інтелекту у машинобудуванні.

4. Пропонується у розділі 2 розглянути перспективи використання комбінованих методів штучного інтелекту і моделей для підвищення адаптивності систем управління технічним станом і експлуатацією мобільних машин.

5. При формуванні архітектури графової нейронної мережі у виробничих системах (розділ 2, п.п. 2.1-2.3), слід було навести типізацію вузлів, класифікацію ребер графу та розглянути їх часову динаміку.

6. Формули агрегації (3.8)-(3.10), стор. 100, в теоретичному обґрунтуванні запропонованого методу подані коректно, проте відсутній аналіз того, в яких умовах кожна з них є оптимальною.

7. Формула (3.12), стор. 101, оновлення стану вузла в графовій нейронній мережі містить додавання попереднього стану, що потребує додаткового пояснення.

8. Розділ 4 присвячено впровадженню методу графових нейронних мереж на підприємстві ТОВ «АРК ГРУПП». Доцільним було б доповнити аналіз порівняння результатів із іншими підприємствами або галузями, що дозволило б ширше продемонструвати універсальність запропонованого підходу, а також потребує більш глибокого експериментального аналізу та формалізації окремих процедур.

9. Для кращого сприйняття викладеного матеріалу варто було б розширити використання схем, блок-діаграм та графічних інтерпретацій технологій цифрових двійників і архітектур графових нейронних мереж. Це відповідає сучасним вимогам Індустрії 4.0 щодо наочності та інтеграції результатів у цифрові платформи.

ВИСНОВОК

Вважаю, що дисертація **ГОЛОВАТОГО Артема Олеговича** на тему **«Підвищення ефективності експлуатації мобільних машин інтелектуалізацією процесів їх використання на підприємстві»**, подана на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» галузі знань 13 «Механічна інженерія», є завершеним, логічно вибудованим та науково обґрунтованим дослідженням, виконаним на високому теоретичному, методичному та прикладному рівнях, не порушує принципів академічної доброчесності та є завершеним науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі галузевого машинобудування. Отримані наукові положення та розроблені програмні засоби мають суттєве значення для розвитку спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» галузі знань 13 «Механічна інженерія». У роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу підвищення ефективності, надійності та адаптивності експлуатації мобільних машин шляхом застосування інтелектуальних методів управління, що відповідає сучасним тенденціям розвитку виробничих систем і цифровізації промисловості в умовах Індустрії 4.0.

Результати дисертаційного дослідження характеризуються науковою новизною, достовірністю та практичною значущістю, достатньо повно відображені

в наукових публікаціях автора, пройшли апробацію на конференціях і підтверджені практичними впровадженнями. Дисертаційна робота за структурою та обсягом, виконана з дотриманням принципів академічної доброчесності, відповідає вимогам Постанові Кабінету Міністрів України №44 "Порядок присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії" від 12 січня 2022 року (редакція від 08.05.2024).

На підставі проведеного аналізу вважаю, що автор дисертації ГОЛОВАТИЙ Артем Олегович заслуговує на присудження ступеня освіти доктора філософії за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» галузі знань 13 «Механічна інженерія».

Офіційний опонент:

декан факультету конструювання та дизайну

Національного університету біоресурсів і

природокористування України,

доктор технічних наук, професор

Іван РОГОВСЬКИЙ

11.05.2026р.



Підтверджую

Сергій ГРИЩЕНКО