

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Дениса КАТАЄВА на тему
«Software and information complex for improving the accuracy of measurements of geometric parameters of power equipment parts based on a neural network» («Програмно-інформаційний комплекс для підвищення точності вимірювань геометричних параметрів деталей енергетичного обладнання на базі нейронної мережі»),
що представлена на здобуття ступеня доктора філософії
з галузі знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»
за спеціальністю 175 «Інформаційно-вимірювальні технології»

Актуальність теми дослідження, її зв'язок із науковими програмами, планами та темами.

Енергетична галузь є однією з ключових сфер забезпечення стабільного функціонування сучасного суспільства. Недостатня точність вимірювання призводить до зниження ресурсу обладнання, підвищення витрат на технічне обслуговування та, в окремих випадках, до аварійних ситуацій.

Використання сучасних інформаційно вимірювальних систем дозволяє досягти високої точності, швидкості та автоматизації процесів контролю. Однак вони мають низку обмежень, серед яких недостатня адаптація до впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів (вібрацій, термічних деформацій, інерційних ефектів).

Актуальність дисертаційної роботи Дениса КАТАЄВА обумовлена необхідністю підвищення точності вимірювань геометричних параметрів деталей енергетичного обладнання, оскільки від точності цих вимірювань безпосередньо залежить надійність і ефективність роботи обладнання у критично важливих умовах експлуатації. Особливо актуальною є задача компенсації некінематичних похибок вимірювань, спричинених зовнішніми факторами, такими як температурні зміни, вібрації та електромагнітні завади, які неможливо усунути

стандартними методами калібрування. Тому розробка програмно-інформаційного комплексу із застосуванням нейронних мереж для компенсації таких похибок є своєчасним та важливим завданням.

Обрана тема дисертації відповідає сучасним тенденціям розвитку інформаційно-вимірювальних технологій в енергетиці. Дисертаційні дослідження Дениса КАТАЄВА пов'язані з такими науково-дослідними роботами: «Розвиток методів та засобів моніторингу стану довкілля об'єктів енергетики на базі бездротових сенсорних мереж» (0123U100127, 2023 – 2027 рр.)

Оцінка наукового рівня дисертації.

Дисертаційна робота Дениса КАТАЄВА складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку літератури та 4 додатків. Робота представлена на 157 сторінках, включає 53 рисунки та 16 таблиць. Список використаних джерел містить 143 найменування.

У *першому* розділі автор проводить аналіз сучасних методів компенсації похибок координатно-вимірювальних систем, встановлює недоліки існуючих рішень та обґрунтовує доцільність використання штучних нейронних мереж для компенсації некінематичних похибок. Розділ має теоретичний характер і містить чітко сформульовані завдання дослідження.

Другий розділ присвячений створенню та калібруванню кінематичної моделі координатно-вимірювальної руки. Запропонована автором комбінована методика калібрування з трьома еталонами дозволяє ефективно усунути систематичні кінематичні похибки.

Третій розділ охоплює проектування програмно-інформаційного комплексу з інтегрованою нейронною мережею, детально описує вибір архітектури нейронної мережі, функцій активації, гіперпараметрів та програмних засобів, які забезпечують високу адаптивність системи до умов вимірювання.

У четвертому розділі автор пропонує ефективні методи підготовки даних для навчання нейронних мереж, створення синтетичних наборів даних з урахуванням дестабілізуючих факторів, а також алгоритми поділу даних на навчальні, валідаційні та тестові множини.

П'ятий розділ містить експериментальні дослідження розробленого комплексу, демонструє зниження некінематичних похибок вимірювань у 6 разів за рахунок застосування нейронних мереж, що підтверджує ефективність запропонованого рішення.

У висновках дисертаційної роботи Дениса КАТАЄВА представлені найбільш суттєві наукові та практичні результати проведеного дослідження. Описано результати розробки універсального методу калібрування координатно-вимірювальної руки, та впровадження одноточкової моделі компенсації кінематичних похибок, яка дозволила значно підвищити точність вимірювань. Описано результати експериментальних досліджень розробленого програмно-інформаційного комплексу із інтегрованою нейронною мережею, що засвідчили його високу ефективність у компенсації некінематичних похибок, забезпечивши шестикратне зменшення похибок порівняно з традиційними методами.

Новизна представлених теоретичних та/або експериментальних результатів проведених здобувачем досліджень.

Наукова новизна проведеного дослідження полягає у розробці нових методів та моделей для підвищення точності вимірювань геометричних параметрів деталей енергетичного обладнання шляхом створення універсального методу калібрування з використанням трьох еталонів, який дозволяє врахувати систематичні похибки вимірювання. Запропонований метод одноточкової компенсації кінематичних похибок координатно-вимірювальної системи забезпечує суттєве зниження залишкових похибок та дозволяє досягти стабільності результатів вимірювання за різних умов роботи. Розроблена модель

навчання нейронних мереж забезпечує адаптивну компенсацію некінематичних похибок, що виникають під впливом зовнішніх факторів, таких як температурні зміни, вібрації, електромагнітні перешкоди, що дозволило досягти шестикратного зниження цих похибок порівняно із традиційними методами компенсації.

Наукова обґрунтованість представлених результатів здобувача.

Розроблений метод універсального калібрування координатно-вимірювальних систем доцільно використовувати у виробничих умовах для забезпечення високої точності контролю геометричних параметрів деталей енергетичного обладнання, що безпосередньо впливає на ресурс та надійність обладнання. Запропонований метод компенсації залишкових кінематичних похибок може бути рекомендований для інтеграції в існуючі вимірювальні комплекси, що дозволить суттєво зменшити похибки вимірювання та покращити якість контролю виробництва. Методика підготовки, навчання та інтеграції нейронних мереж у програмно-інформаційні комплекси може використовуватись для створення високоточних адаптивних систем вимірювання, здатних працювати в складних умовах виробництва з урахуванням широкого спектра дестабілізуючих факторів. Це дозволяє значно підвищити конкурентоспроможність вітчизняних виробників обладнання на сучасному ринку енергетичного машинобудування.

Відомості про дотримання академічної доброчесності.

У дисертації Дениса КАТАЄВА фактів академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації отриманих результатів, не виявлено. Дисертація Дениса КАТАЄВА повністю відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти наукової установи про присудження ступеня доктора

філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44.

Недоліки та зауваження до роботи.

1. В описі алгоритму калібрування (розділ 2) автором пропонується використання саме трьох еталонів. Варто було б більш детально обґрунтувати, чому саме така кількість еталонів є оптимальною і як зміна кількості еталонів може вплинути на точність калібрування та складність процедури.

2. У розділі 3 дисертації автором детально обґрунтовано вибір архітектури нейронної мережі та наведено результати для значної кількості варіантів моделей. Проте було б доцільно зазначити у тексті дисертації, чому було обрано саме ці типи нейронних мереж і не розглядалась можливість застосування інших перспективних типів мереж, таких як рекурентні (RNN) або згорткові (CNN), які могли б додатково підвищити точність компенсації похибок.

3. У четвертому розділі недостатньо висвітлено аналіз чутливості нейронної мережі до варіації окремих гіперпараметрів (кількість шарів, кількість нейронів, темп навчання тощо). Рекомендується надати більш глибокий аналіз впливу цих параметрів на точність та стабільність навчання нейромережі.

4. У п'ятому розділі при описі результатів навчання нейронних мереж було б доцільно додати додаткові графічні залежності (графіки навчання), які б наочно демонстрували динаміку зміни точності мережі та процесу збіжності під час навчання.

5. У п'ятому розділі представлено результати експериментальних досліджень ефективності запропонованого програмно-інформаційного комплексу лише для окремих типів функцій активації. Потребує додаткового пояснення, чому не було проведено більш розширений порівняльний аналіз ефективності використання

різних функцій втрат (loss functions) та їх вплив на кінцеву точність і швидкість навчання нейронної мережі.

6. У роботі недостатньо уваги приділено питанню швидкодії розробленого комплексу, зокрема впливу часу обробки даних нейронною мережею на загальну продуктивність вимірювального процесу, що є важливим для практичного використання розробленого рішення в реальних умовах виробництва.

Попри наявність невеликої кількості друкарських помилок, робота з точки зору стилю і мови виконана на досить високому рівні.

Зазначені зауваження мають рекомендаційний характер, є несуттєвими і не знижують наукової цінності та практичного значення отриманих результатів дисертації Дениса КАТАЄВА.

Висновки щодо дисертаційної роботи.

Дисертація Дениса КАТАЄВА «Software and information complex for improving the accuracy of measurements of geometric parameters of power equipment parts based on a neural network» (Програмно-інформаційний комплекс для підвищення точності вимірювань геометричних параметрів деталей енергетичного обладнання на базі нейронної мережі) є завершеною науковою працею, в якій у повній мірі вирішено поставлене наукове завдання щодо компенсації кінематичних та некінематичних похибок координатно-вимірювальних систем із застосуванням нейронних мереж. Обґрунтованість і достовірність наукових положень та висновків забезпечується чіткою постановкою задач, використанням сучасних методів аналізу, моделювання, проведенням експериментальних досліджень та практичною апробацією результатів на підприємствах України.

Дисертаційна робота Дениса КАТАЄВА є самостійно виконаним дослідженням, що характеризується високим рівнем наукової новизни та практичної значущості. Висновки та результати, викладені в дисертації, отримані

автором особисто. Основні наукові результати дисертації в повному обсязі опубліковані у 9 наукових працях, серед яких 6 статей у фахових наукових виданнях України, 3 матеріали міжнародних та національних конференцій.

Вважаю, що Денис КАТАЄВ у повній мірі володіє сучасною методологією наукових досліджень та заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 175 «Інформаційно-вимірювальні технології».

Рецензент

кандидат технічних наук,
старший дослідник,
старший науковий співробітник
відділу моніторингу і діагностики
об'єктів енергетики
Інституту загальної енергетики
НАН України

Ігор БОГАЧЕВ



[Handwritten signature]

Богачев І.

20.25.р.

[Handwritten signature]