

ВІДГУК

офіційного опонента Максима БОНДАРЕНКА

на дисертаційну роботу **Катасва ДЕНИСА**

«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»

1. Актуальність теми дисертації

Енергетична галузь є однією з ключових сфер забезпечення стабільного функціонування сучасного суспільства. Надійність, ефективність та безпечність енергетичного обладнання, такого як турбіни, генератори, котли прямо залежать від точності виготовлення, та відповідності деталей стандартам і технічним вимогам. Відхилення геометричних параметрів може призвести до зниження продуктивності обладнання, його передчасного зношення, значних витрат на ремонт, а в критичних випадках, до аварійних ситуацій із катастрофічними наслідками для виробництва та навколишнього середовища.

Використання сучасних інформаційно-вимірювальних систем дозволяє досягти високої точності, швидкості та автоматизації процесів контролю. Проте, вони мають низку обмежень, серед яких слід відмітити недостатню адаптацію до впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів (вібрацій, термічних деформацій, інерційних ефектів).

Актуальність роботи обумовлена необхідністю усунення існуючих обмежень і полягає у розробці програмно-інформаційного комплексу з інтегрованою нейронною мережею, впровадження якого у склад інформаційно-вимірювальної системи на базі координатно-вимірювальної руки дозволить ефективно компенсувати вплив зовнішніх дестабілізуючих факторів, чим суттєво підвищить точність вимірювань геометричних параметрів деталей енергетичного обладнання.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами

Дисертаційна робота пов'язана з науково-дослідною роботою: «Розвиток методів та засобів моніторингу стану доквілля об'єктів енергетики на базі бездротових сенсорних мереж» (0123U100127, 2023–2027 рр.).

3. Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Обґрунтованість та достовірність наукових положень і висновків дисертації Дениса КАТАЄВА зумовлені проведенням порівняльним аналізом літературних джерел, що включають 143 найменувань стосовно теми дисертації, математичною та логічною строгістю побудови підходів і моделей, коректністю постановки й вирішення завдань досліджень, використанням широко апробованих методів аналізу ризиків складних систем та методів багатокритеріального прийняття рішень.

Обґрунтованість висновків і одержаних результатів дисертаційної роботи підтверджуються результатами комп'ютерного моделювання та засвідчують високу ефективність запропонованих методів і засобів. Здобути Катаєвим ДЕНИСОМ наукові результати відповідають завданням досліджень та підтверджуються їх апробацією на науково-технічних конференціях і семінарах.

Високий рівень отриманих результатів також підтверджується їх впровадженням у практику контролю вимірювань геометричних параметрів деталей ТОВ «ЕКО ЛЮКС» та ТОВ «АВА ТЕК».

В дисертаційній роботі сформовано наукове завдання, що полягає у розробці програмно-інформаційного комплексу на базі нейронної мережі, впровадження якого дозволить підвищити точність вимірювання геометричних параметрів деталей енергетичного обладнання. Програмно-інформаційний комплекс інтегрований в інформаційно-вимірювальну систему має забезпечувати компенсацію дестабілізуючих факторів, адаптацію до змін умов експлуатації та високу продуктивність у складних виробничих умовах. Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано в повному обсязі, а здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

4. Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Дениса КАТАЄВА повністю відповідає стандарту вищої освіти зі спеціальності 175 «Інформаційно-вимірювальні технології» та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Інформаційно-вимірювальні технології в енергетиці».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям підвищення ефективності режимів роботи розподільних мереж.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Дениса КАТАЄВА є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела.

5. Оцінка мови, структури та змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота виконана англійською мовою, оформлена відповідно до вимог наказу Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 року №40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації». Стиль викладу характеризується логічністю, структурованістю та послідовністю викладання матеріалу, із вдалим застосуванням фахової науково-технічної термінології, яка відповідає сучасним стандартам галузі інформаційно-вимірювальних технологій. Автор демонструє достатній рівень мовної культури, текст практично не містить граматичних або стилістичних помилок, що свідчить про високу якість редакційної підготовки дисертації.

Робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (143 найменувань) та додатків. Загальний обсяг роботи становить 157 сторінок, включає 53 рисунки та 16 таблиць. Використання значної кількості ілюстративного матеріалу позитивно впливає на розуміння складних технічних концепцій та забезпечує ефективну презентацію результатів дослідження.

У вступі автором детально обґрунтована актуальність теми дослідження, яка пов'язана з необхідністю підвищення точності вимірювань геометричних параметрів деталей енергетичного обладнання шляхом розроблення програмно-інформаційного комплексу з інтегрованою нейронною мережею. Чітко сформульовано мету і задачі дослідження, визначено його об'єкт і предмет, окреслено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів. Також наведено відомості щодо апробації результатів на конференціях, перелік наукових публікацій та особистий внесок здобувача у проведенні дослідження.

Перший розділ присвячений аналізу сучасних методів підвищення точності вимірювань за допомогою координатно-вимірювальної руки. Проведено ґрунтовний аналіз джерел кінематичних і некінематичних похибок, детально описано проблематику компенсації впливу дестабілізуючих факторів, зокрема, теплових деформацій, люфтів у з'єднаннях та апаратних похибок еncoderів. Встановлено, що більшість сучасних підходів не забезпечують адекватної компенсації некінематичних похибок через їхню складну природу, що і формує підґрунтя для інтеграції нейронних мереж у склад інформаційно-вимірювальних систем. Автором чітко сформульована постановка наукової задачі, яка визначає подальший напрям досліджень.

Другий розділ роботи присвячений створенню ефективної кінематичної моделі координатно-вимірювальної руки з використанням параметрів Денавіта–Хартенберга. Наведено детальний математичний опис моделі, запропоновано комбінований метод калібрування, що враховує різноманітні похибки, а також розроблено метод компенсації залишкових кінематичних похибок за допомогою одноточкової моделі корекції. Отримані теоретичні положення підтверджено

чіткими математичними формулами та схемами, що забезпечує можливість їх практичного використання.

Третій розділ є центральним з точки зору розроблення програмно-інформаційного комплексу для координатно-вимірювальної руки, інтегрованого з нейронною мережею. У ньому представлено структурну схему розробленого комплексу, детально обґрунтовано вибір архітектури нейронної мережі та визначено критерії її побудови. Особливу увагу приділено програмним засобам реалізації нейронної мережі, вказано, що для створення нейронної мережі застосовано мову програмування Python з використанням популярних сучасних бібліотек PyTorch, NumPy, SciPy, scikit-learn та ін. Вибір саме цих програмних інструментів є повністю обґрунтованим з огляду на сучасні тенденції розвитку машинного навчання.

Четвертий розділ містить ґрунтовний опис розроблених алгоритмів підготовки даних для навчання нейронної мережі. Автор розробив і запропонував методи генерації синтетичних наборів даних, які ефективно імітують вплив зовнішніх дестабілізуючих факторів, таких як температурні деформації, похибки енкодерів та люфти у з'єднаннях. Проведено обґрунтування методу нормалізації вхідних даних, що значно поліпшує якість навчання нейромережі. Отримані результати є важливими для забезпечення ефективності практичного застосування розробленої системи.

П'ятий розділ роботи має експериментальний характер, де автором представлено результати експериментального дослідження розробленого програмно-інформаційного комплексу з інтегрованою нейронною мережею. Проведено ґрунтовний аналіз впливу вибору функцій активації та параметрів навчання на точність роботи нейронної мережі. Результати експериментів демонструють значне підвищення точності вимірювань та підтверджують ефективність запропонованих підходів до компенсації некінематичних похибок.

У **висновках** узагальнено результати дослідження, чітко сформульовано наукову новизну роботи, що підтверджена експериментально. Практична цінність роботи обґрунтована успішним впровадженням результатів на підприємствах, що підтверджено відповідними актами впровадження. Додатки до роботи містять важливі деталі щодо параметрів моделей, алгоритмів та структури розробленого програмного комплексу, що дозволяє переконливо підтвердити повноту та достовірність представлених результатів.

Загальна оцінка роботи: Дисертаційна робота є повноцінним завершеним дослідженням, в якому отримані результати мають суттєву наукову новизну та значне практичне значення. Робота виконана на високому методичному, теоретичному та експериментальному рівні, відповідає сучасним стандартам і вимогам, що висуваються до дисертаційних досліджень. Вважаю, що автор заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за результатами представленої дисертаційної роботи.

6. Наукове значення та практична цінність

У дисертаційній роботі вперше отримано такі наукові результати, які визначають її новизну:

1. Запропоновано універсальний метод калібрування, що полягає у використанні трьох калібрувальних еталонів в межах однієї процедури, що дає змогу врахувати систематичні похибки при зондуванні поверхні, оцінити здатність координатно-виміральної руки стабільно відтворювати одну і ту ж точку в просторі та визначити параметри відтворюваності лінійного переміщення координатно-виміральної руки.

2. Розроблено метод компенсації залишкової кінематичної похибки з використанням одноточкової моделі корекції залишкових похибок, що дало змогу зменшити кінематичну складову залишкової похибки у 4 рази.

3. Набула подальшого розвитку теорія навчання нейронних мереж, що дозволило автоматично враховувати змінні умови вимірювань та компенсувати вплив дестабілізуючих факторів, що дало змогу зменшити некінематичну складову залишкової похибки у 6 разів.

Практичне значення одержаних у дисертаційній роботі результатів полягає у розробленні програмно-інформаційного комплексу, що дозволяє підвищити точність вимірювань геометричних параметрів деталей енергетичного обладнання у складних виробничих умовах. Основні аспекти практичної цінності включають:

1. Запропоновано структуру інформаційно-виміральної системи, яка базується на поєднанні інформаційно-виміральної системи та програмно-інформаційного комплексу з інтегрованою нейронною мережею для підвищення точності вимірювань геометричних параметрів деталей енергетичного обладнання.

2. Розроблено програмно-інформаційний комплекс з інтегрованою нейронною мережею, що дає змогу виконувати калібрування, оброблення даних, навчання нейронної мережі та автоматизацію процесів компенсації дестабілізуючих факторів.

3. Створено 432 модифікації нейронних мереж для аналізу поточних даних процесу вимірювання геометричних параметрів деталей енергетичного обладнання, що дозволило врахувати змінні умови вимірювань та компенсувати вплив дестабілізуючих факторів.

7. Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Наукові результати дисертації Дениса КАТАЄВА висвітлені у 6 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 5 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 1 стаття у міжнародному виданні; 1 патент на корисну модель. Також результати дисертації були апробовані на трьох наукових фахових конференціях.

Публікації здобувача мають високий науковий рівень, проходили рецензування та перевірку на плагіат згідно умов видавництва. Особистий внесок

здобувача до представлених наукових публікацій є вагомим. Публікації охоплюють усі основні наукові результати дисертаційного дослідження. Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

8. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

Загалом дисертаційна робота має високий науково-технічний рівень, проте під час її аналізу було виявлено кілька зауважень і рекомендацій, які варто врахувати для покращення якості роботи:

- 8.1. У першому розділі дисертації (стор. 25, стор. 28) наведено таблиці (табл. 1.1, табл. 1.2), що описують фактори виникнення кінематичних і некінематичних похибок, проте відсутні посилання на конкретні літературні джерела, що значно посилило б аргументацію автора.
- 8.2. При розгляді математичних моделей компенсації похибок (стор. 27-32) відсутні конкретні числові приклади розрахунків похибок. Їх наведення дозволило б краще оцінити практичну ефективність запропонованих підходів.
- 8.3. У другому розділі (стор. 38-42) докладно описано кінематичну модель на основі параметрів Денавіта–Хартенберга, але не вистачає графічних матеріалів (наприклад, схем чи 3D-візуалізації), які значно полегшили б сприйняття цієї моделі.
- 8.4. У розділі 3 (п. 3.3, стор. 76-80) зазначено використання Python і бібліотек PyTorch, NumPy, SciPy тощо для розроблення програмного комплексу, але відсутні технічні характеристики використаного апаратного забезпечення, на якому виконувалось навчання нейронної мережі, що є важливим для оцінки швидкодії та масштабованості системи.
- 8.5. У розділі 4 (п. 4.1, с. 83-89) описано методи генерації синтетичних даних для нейромережі, але відсутній порівняльний аналіз отриманих синтетичних даних із експериментально отриманими реальними даними, що могло б додатково підтвердити коректність запропонованих підходів.
- 8.6. В експериментальному розділі 5 (стор. 105-125) недостатнім є представлення графіків, які ілюструють динаміку процесу навчання нейронної мережі (наприклад, залежності помилок навчання і тестування), що дало б більш детальне уявлення про ефективність тренування мережі.
- 8.7. У роботі загалом відсутній окремий підрозділ, у якому були б чітко визначені обмеження застосованих методів, а також окреслені конкретні напрями майбутніх досліджень, що могло б суттєво розширити перспективність роботи.

Вважаю, що зазначені вище зауваження не є критичними і не зменшують загальну позитивну оцінку дисертації, її наукову новизну та практичну значущість. Проте, їх врахування дозволить суттєво підвищити якість та цінність подальших досліджень.

9. Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії 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») виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації». Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6 – 9 «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 р. № 44.

Здобувач Денис КАТАЄВ заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації» за спеціальністю 175 «Інформаційно-вимірювальні технології».

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри приладобудування,
мехатроніки та комп'ютеризованих
технологій Черкаського державного
технологічного університету

Підпис Бондаренка М.О. засвідчую:
Учений секретар Черкаського
державного технологічного
університету, к.т.н. доцент



Максим БОНДАРЕНКО



Ірина МИРОНЕЦЬ

«28» липня 2025 року

REVIEW

official opponent Maksym BONDARENKO

on the dissertation thesis by Denys KATAIEV

"Software and information complex for improving the accuracy of measurements of geometric parameters of power equipment parts based on a neural network"
presented for the degree of Doctor of Philosophy
in the field of knowledge 17 "Electronics, Automation and Electronic Communications"
in the specialty 175 "Information and Measuring Technologies"

1. Relevance of the dissertation topic

The energy industry is one of the key areas for ensuring the stable functioning of modern society. Reliability, efficiency, and safety of power equipment, such as turbines, generators, boilers, contingent upon manufacturing accuracy and compliance of parts with standards and technical requirements. Deviation of geometric parameters can lead to a decrease in the equipment performance, its premature wear, significant repair costs, and, in critical cases, to emergency situations with catastrophic consequences for production and the environment.

Modern information and measurement systems facilitate highly accurate, fast, and automated control processes. However, these systems pose a number of limitations, for instance, insufficient ability to adapt to external destabilizing factors (vibrations, thermal deformations, inertial effects).

The relevance of the dissertation topic stems from the necessity to overcome existing limitations. It centers on the development of a software and information system incorporating an integrated neural network, whose implementation within a coordinate measuring arm-based information and measurement system will effectively mitigate the influence of external destabilizing factors, thereby significantly enhancing the accuracy of geometric parameter measurements for power equipment components.

2. Connection of work with scientific programs, projects or plans

The dissertation is related to the research topic: "Development of methods and means for monitoring the state of the environment of energy facilities based on wireless sensor networks" (0123U100127, 2023–2027).

3. Assessment of the validity, reliability and novelty of the scientific results presented in the dissertation

The validity and reliability of the scientific provisions and conclusions of Denys KATAIEV'S dissertation are attested by the comparative analysis of literature sources, including 143 titles related to the dissertation topic, mathematical and logical rigor in selecting approaches and constructing models, accurate setting and solving research

problems, amply tested methods for analyzing the risks of complex systems and methods of multi-criteria decision-making.

The validity of the conclusions and the results of the dissertation thesis are confirmed by the results of computer modeling and testify to the high efficiency of the proposed methods and tools. The scientific results obtained by Denys KATAIEV correspond to the objectives of research and have been approbated at scientific and technical conferences and seminars.

The high level of the results obtained has been confirmed by their implementation in the practice of controlling measurements of geometric parameters of components of ECO LUX LLC and AVA TEK LLC.

The dissertation thesis formulates a clear scientific objective: the development of a software and information system based on a neural network, aimed at enhancing the accuracy of geometric parameter measurements for power equipment components. This system, integrated into an information and measurement system, has been designed to compensate for destabilizing factors, adapt to fluctuating operational conditions, and maintain high performance under demanding industrial environments. Thus, this dissertation thesis demonstrates the full execution of its scientific objective, and the applicant has clearly mastered the methodology of scientific activity.

4. Assessment of the dissertation content, completion, and adherence to the principles of academic integrity

In terms of its content, the dissertation by Denys KATAIEV fully complies with the standard of higher education in the specialty 175 “Information and Measuring Technologies” and the areas of research in accordance with the academic program “Information and Measuring Technologies in the Energy Sector”.

The dissertation is a completed research and represents the applicant’s personal contribution to the field of improving the efficiency of distribution network operation modes.

After considering the similarity report, we concluded that the dissertation thesis by Denys KATAIEV is the result of the dissertation candidate’s independent research where elements of falsification, compilation, fabrication, plagiarism or borrowing are absent. The ideas, results and excerpts by other authors are presented as proper references to the relevant sources.

5. Assessment of the language, structure, and content of the dissertation thesis

The dissertation thesis is performed in English, compiled and formatted in compliance with the requirements of the Order No. 40 of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated January 12, 2017 “On Approval of the Requirements for the Preparation of the Dissertation”. The thesis is distinguished by a logical, clearly

structured, and coherent presentation of the material, complemented by the appropriate use of professional scientific and technical terminology that aligns with contemporary standards in the field of information and measurement technologies. The author demonstrates a commendable level of linguistic competence, with minimal grammatical or stylistic errors, reflecting the high editorial quality of the dissertation.

Structurally, the thesis comprises an introduction, five chapters, general conclusions, a bibliography listing 143 sources, and supplementary appendices. The total length of the work spans 157 pages and includes 53 figures and 16 tables. The substantial use of illustrative material enhances the comprehension of complex technical concepts and contributes to the effective presentation of the research findings.

In the introduction, the author substantiates in detail the relevance of the research topic, which hinges on the necessity to enhance the accuracy of geometric parameter measurements for power equipment parts by developing a software and information complex with an integrated neural network. The introduction also contains information about the approbation of the thesis findings at conferences and about the candidate's personal contribution to the research, supplemented by the list of the candidate's research publications.

Chapter One focuses on the analysis of modern coordinate measuring arm-based methods for improving measurement accuracy. In the first place, a thorough insight into the sources of kinematic and non-kinematic errors has been conducted. The chapter reviews in great detail the problems of compensating for the influence of destabilizing factors, in particular, thermal deformations, backlash in connections and encoder hardware errors. The author has established that most modern approaches do not provide adequate compensation for non-kinematic errors due to their complex nature, which forms the basis for the integration of neural networks into the composition of information and measurement systems. The author has clearly formulated the research objective, thus determining further research.

Chapter Two develops an effective kinematic model of the coordinate measuring arm based on the Denavit-Hartenberg parameters. The chapter offers a detailed mathematical description of the proposed model, accompanied by a combined calibration method that accounts for various sources of error. Additionally, a technique for compensating residual kinematic errors based on a single-point correction model is developed, enabling its practical implementation.

Chapter Three serves as the core of the dissertation, focusing on the development of a software and information complex for a coordinate measuring arm integrated with a neural network. It presents a structural diagram of the designed system, thoroughly justifies the selection of the neural network architecture, and outlines the criteria guiding its development. Particular emphasis is placed on the software tools employed for the implementation of the neural network, in particular, Python programming language relying on popular modern libraries PyTorch, NumPy, SciPy, scikit-learn,

etc. The choice of these software tools is fully justified given the current trends in the development of machine learning.

Chapter Four contains a thorough description of the developed algorithms for preparing data to train a neural network. The author has developed and proposed methods for generating synthetic datasets that effectively simulate the impact of external destabilizing factors, such as temperature deformations, encoder errors and backlash in connections. The results obtained in this chapter are significant for ensuring efficient practical application of the developed system.

Chapter Five is of an experimental nature, whereby the author presents the experimental study results of the developed software and information complex with an integrated neural network. A thorough analysis of the influence of the selected activation functions and training parameters on the accuracy of the neural network has been studied in this chapter. The experimental results demonstrate a significant increase in the accuracy of measurements and attest to the efficiency of the proposed approach to compensate for non-kinematic errors.

The **conclusions** effectively summarize the study's outcomes and clearly articulate the dissertation's scientific novelty, which is substantiated by experimental validation. The practical significance of the research is demonstrated through its successful implementation within industrial enterprises, as confirmed by corresponding acts of application. The appendices provide comprehensive specifications of the developed models, algorithms, and the structural framework of the software package, reinforcing the completeness and credibility of the reported results.

General assessment of the dissertation: Overall, the dissertation represents a thorough and well-executed research. The findings exhibit notable scientific innovation and substantial practical relevance. Conducted with a high degree of methodological, theoretical, and experimental rigor, the work aligns with contemporary academic standards and the formal requirements of dissertation research. In light of the dissertation's achievements, I consider the author deserving of the Doctor of Philosophy degree.

6. Scientific significance and practical value

The proposed dissertation has for the first time yielded the following scientific results, which determine its novelty:

1. A universal calibration method has been proposed, integrating three calibration standards into a single procedure. This approach enables the compensation of systematic errors in surface sensing, facilitates the assessment of the coordinate measuring arm's stability in reproducing spatial reference points, and determines the parameters related to its linear movement reproducibility.

2. A compensation technique for residual kinematic error has been developed based on a single-point correction model. This method achieves a fourfold reduction in the kinematic component of the residual error.

3. Advancements in neural network learning theory allow for the automatic adaptation to varying measurement conditions and effective compensation for destabilizing factors. As a result, the non-kinematic component of the residual error was reduced by a factor of six.

The practical significance of the results obtained in the dissertation arise from the development of a software and information complex that allows for enhancing the accuracy of geometric parameter measurements for power equipment parts under challenging production conditions. The key aspects of the dissertation's practical value embrace:

1. The structure of the information and measurement system has been proposed, which relies on integrated information and measurement systems, and a software and information complex with an integrated neural network to increase the accuracy of measurements for geometric parameters of power equipment parts.

2. A software and information complex with an integrated neural network has been developed, which allows for calibrating, processing data, training the neural network, and automating the processes of compensating for destabilizing factors.

3. 432 modifications for neural networks were developed to analyze current data of measuring geometric parameters of power equipment components, which achieves compensating both for variable measurement conditions and destabilizing impacts.

7. Publication of the results of the dissertation thesis

The research findings of Denys KATAIEV's dissertation are featured in 6 scientific publications, including: 5 articles in research journals included in the list of scientific professional publications of Ukraine as of the publication date; 1 article in an international edition; 1 utility model patent. Additionally, the dissertation findings have been probated at three scientific professional conferences.

The candidate's publications demonstrate a high scientific standard and have undergone peer review and plagiarism checks in accordance with the policies of the respective publishing houses. The candidate's personal contribution to these works is significant, reflecting a strong individual involvement in the research and writing process. The publications comprehensively encompass all key scientific findings presented in the dissertation. Accordingly, the scientific results outlined in the dissertation are fully substantiated by the candidate's published works.

8. Disadvantages and comments on the dissertation

Overall, the dissertation is performed at a high scientific and technical level. Nonetheless, I would like to make several comments and recommendations that may improve the quality of the dissertation:

- 8.1. Chapter One of the dissertation (p. 25, p. 28) contains tables (Table 1.1, Table 1.2) describing the factors of kinematic and non-kinematic errors. However, no references to specific literature sources are specified, which, if they were present, would significantly fortify the author's argumentation.
- 8.2. When considering mathematical models of error compensation (pp. 27-32), the author offers no specific numerical examples of error calculations. The examples could serve for a better assessment of the practical efficiency of the proposed approaches.
- 8.3. Chapter Two (pp. 38-42) describes in detail a kinematic model based on Denavit-Hartenberg parameters, at the same time lacking graphic materials (e.g., diagrams or 3D rendering) that would greatly facilitate the perception of the proposed model.
- 8.4. Chapter Three (Clause 3.3, pp. 76-80) indicates the use of Python and the libraries PyTorch, NumPy, SciPy, etc., for the development of the software package, without mentioning technical characteristics of the hardware deployed for neural network training, which is important for evaluating the speed and scalability of the system.
- 8.5. Chapter Four (clause 4.1, pp. 83-89) describes methods for generating synthetic data for a neural network. Here, a comparative analysis of the obtained synthetic data with experimentally obtained real data could have further confirmed the validity of the proposed approaches.
- 8.6. In the experimental section of Chapter Five (pp. 105-125), the graphs that illustrate the dynamics of the neural network training process (for example, the dependence of training and testing errors) could have been presented in more detail, which would enhance the reader's comprehension of the efficiency of training the network.
- 8.7. Throughout the dissertation, a section designated to clearly define the limitations of the methods used or outline specific areas of future research could not be located. Otherwise, such a section could significantly expand the prospects of the research.

I believe that the above remarks should not be considered critical and do not mitigate the overall positive assessment of the dissertation, its scientific novelty and practical significance. However, considering the above remarks will significantly increase the quality and value of further research.

9. Conclusion on the dissertation work

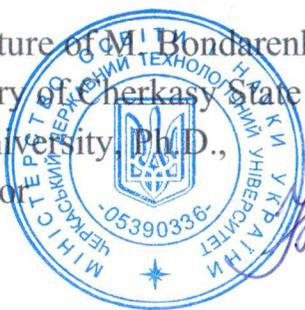
I believe that the dissertation of the PhD candidate Denys KATAIEV on the topic “Software and information complex for improving the accuracy of measurements of geometric parameters of power equipment parts based on a neural network” is performed at a high scientific level, does not violate the principles of academic integrity and is a completed scientific research, the totality of theoretical and practical results of which solves a scientific problem that is essential for the field of knowledge 17 “Electronics, Automation and Electronic Communication”. The dissertation fully complies in terms of relevance, practical value and scientific novelty with the requirements of the current legislation of Ukraine, which are provided for in paragraphs 6–9 of the “Procedure for awarding the degree of Doctor of Philosophy and cancellation of the decision of the one-time specialized academic council of a higher education institution, scientific institution on awarding the degree of Doctor of Philosophy”, approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated January 12, 2022 No. 44.

The applicant Denys KATAIEV deserves to be awarded the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 17 “Electronics, Automation and Electronic Communications” in the specialty 175 “Information and Measurement Technologies”.

Official opponent:

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of
Instrumentation, Mechatronics and
Computerized Technologies of Cherkasy
State Technological University

I certify the signature of M. Bondarenko:
Scientific Secretary of Cherkasy State
Technological University, Ph.D.,
Associate Professor



Iryna MYRONETS

July 28, 2025