

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Романенка Владислава Володимировича
**«Інформаційно-вимірювальна технологія контролю якості
виробів адитивного виробництва»**,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
з галузі знань 17 «Інформаційно-вимірювальні технології»
за спеціальністю 175 «Інформаційно-вимірювальні технології»

Актуальність теми дослідження, її зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Актуальність дисертаційного дослідження Романенка Владислава Володимировича зумовлена сучасними тенденціями розвитку технологій адитивного виробництва, які дедалі активніше впроваджуються в машинобудівній, авіаційній, медичній, оборонній та енергетичній промисловості. Суттєвим викликом при використанні 3D-друку в промислових умовах є забезпечення стабільної якості виготовлених виробів, що вимагає створення адаптивних та інтелектуальних систем контролю у реальному часі. У цьому контексті запропонована дисертантом інформаційно-вимірювальна технологія, що базується на використанні математичних моделей і нейромережевих алгоритмів аналізу зображень, є надзвичайно актуальною. Вона дозволяє автоматизувати процеси виявлення дефектів на ранніх стадіях виробництва, знижувати ризики браку та забезпечувати відповідність продукції високим стандартам якості.

Тематика дисертаційної роботи тісно пов'язана з пріоритетними напрямками науково-технічного розвитку України, зокрема в частині цифровізації виробництва, розвитку розумних виробничих систем, метрологічного забезпечення та інтеграції інтелектуальних систем у критично важливі галузі промисловості. Дослідження також відповідає завданням державних програм розвитку високотехнологічної продукції.

Робота виконувалась у межах наукової тематики Інституту загальної енергетики НАН України (відділу моніторингу і діагностики об'єктів енергетики), а окремі її результати інтегровані до тем держбюджетного та госпдоговірного фінансування, що підтверджено відповідними довідками про зв'язок із державною НДР. Участь здобувача в науково-дослідних проєктах Інституту, а також залучення до виконання експериментальних частин робіт у партнерстві з промисловими підприємствами свідчить про практичну спрямованість дослідження та його відповідність сучасним викликам у сфері вимірювальних технологій.

Тема дисертації Романенка В. В. є актуальною у зв'язку з активним впровадженням технологій адитивного виробництва в критично важливі галузі – зокрема, в машинобудування, оборонну промисловість, медицину та енергетику. У таких сферах особливо важливим є забезпечення високої якості продукції, яку виготовляють методом 3D-друку. Утім, традиційні методи контролю не

забезпечують оперативної діагностики дефектів у режимі реального часу та не враховують динамічні зміни параметрів друку, що обумовлює потребу в нових, інтелектуальних системах вимірювання та контролю.

Запропонована в дисертації інформаційно-вимірювальна технологія базується на поєднанні методів математичного моделювання, нейромережевої обробки зображень та комп'ютерного зору, що відповідає сучасним світовим трендам цифровізації виробництва. Вона дозволяє не лише виявляти дефекти в процесі друку, але й інтегрувати систему контролю якості безпосередньо в цикл виробництва. Це забезпечує вищу стабільність процесів, скорочення втрат і підвищення ефективності..

Актуальність обраної теми дисертаційної роботи. Результати дисертаційної роботи Романенка В. В. були використані при виконанні науково-дослідних робіт, що реалізовувалися в Інституті у межах державного фінансування. Зокрема, елементи розробленої інформаційно-вимірювальної системи контролю якості друку стали результатом виконання робіт в межах НДР (КПКВК 6541230, № 0124U000005д). Здобувачем апробовано підходи до опрацювання графічної інформації з використанням глибоких нейронних мереж, які були адаптовані до задач ідентифікації дефектів у виробках, виготовлених методами 3D-друку. Окремі алгоритмічні рішення та архітектурні підходи, розроблені в дисертації, були впроваджені в ході виконання теми з підприємствами виробничого сектору, пов'язаної з виготовленням та неруйнівним контролем якості конструктивних елементів безпілотних літальних апаратів. Зокрема, результати роботи застосовувалися під час розробки адаптивної системи моніторингу геометричних параметрів виробів та визначення дефектів у реальному часі на основі відеопотоку з вбудованих відеокамер 3D-принтерів. Це свідчить про практичну значущість дисертації та її тісний зв'язок з пріоритетними науково-технічними програмами України.

Оцінка наукового рівня дисертації. Дисертаційна робота Романенка В.В. викладена на 162 сторінках, складається зі вступу, 4 розділів з висновками до кожного з них, загальних висновків, списку використаних джерел та 8 додатків. Обсяг основного тексту дисертації становить 123 сторінок друкованого тексту. Робота містить 14 таблиць та 61 рисунок. Список використаних джерел налічує 109 найменувань.

Перший розділ дисертаційної роботи присвячено аналізу сучасного стану засобів контролю якості у сфері адитивного виробництва, з акцентом на методи автоматизованого опрацювання зображень і застосування інтелектуальних інформаційно-вимірювальних технологій. У вступній частині автор визначає місце задачі контролю якості в загальній структурі технологічного процесу 3D-друку, наголошуючи на її критичному значенні для забезпечення надійності виробів, що застосовуються у відповідальних галузях, зокрема оборонній та медичній. Проаналізовано особливості сучасних технологій адитивного виробництва

(зокрема, FDM та DLP), які передбачають послідовне нашарування матеріалу, що створює ризики утворення дефектів у вигляді порожнин, зміщень шарів, деформацій або неоднорідностей заповнення. Більшість наявних методів контролю базуються на візуальному або постфактум-аналізі, що не дозволяє вчасно виявляти дефекти в процесі виготовлення. У розділі проведено огляд методів виявлення дефектів на основі цифрових зображень, що формуються у процесі друку. Розглянуто як класичні методи опрацювання зображень, так і сучасні підходи на основі штучного інтелекту, зокрема згорткові нейронні мережі. Автор підкреслює недостатню адаптивність класичних методів до умов реального виробництва, варіативність геометрії виробів та освітлення, що значно знижує їхню ефективність. У розділі узагальнено сучасний стан розробки інформаційно-вимірювальних систем у галузі контролю якості, у тому числі з урахуванням специфіки метрологічного забезпечення таких технологій. Показано, що існуючі системи переважно не враховують динамічний характер процесів 3D-друку, обмежені щодо типів об'єктів та здатності адаптуватися до змін у параметрах друку в режимі реального часу. На основі аналізу сформульовано висновки щодо недостатності існуючих технічних рішень і необхідності створення нової, більш універсальної, адаптивної та інтелектуальної технології контролю. Саме це й визначило подальший напрям дисертаційного дослідження – розробку інформаційно-вимірювальної технології з використанням математичного моделювання коригування яскравості та глибокого навчання для виявлення дефектів 3D-друку у режимі реального часу.

Другий розділ присвячено розробці математичних моделей, що лежать в основі запропонованої інформаційно-вимірювальної технології. Основну увагу приділено моделюванню процесу утворення зображення в умовах освітлення, характерного для середовища адитивного виробництва. Автор обґрунтовує вибір параметрів, що впливають на формування цифрового зображення (розподіл інтенсивності / яскравості, тіні, контрастність, текстура поверхні), та враховує їх у побудові моделі. Сконцентровано увагу на оптичних характеристиках середовища та геометричних особливостях об'єктів, які впливають на точність виявлення дефектів. Зокрема, враховано вплив кута освітлення, рівня розсіяного світла, фізичних властивостей матеріалів на якість отриманих зображень. Це дало змогу формалізувати задачу виявлення дефектів як задачу аналізу зміни інтенсивності піксельних значень у проєкції тривимірної структури на площину. У межах цього розділу запропоновано математичну модель відображення ідеального та дефектного зразка, яка враховує характерні ознаки дефектів. Така модель стала базою для подальшої генерації синтетичних даних і формування навчальних вибірок для нейронної мережі, що є особливо важливим за умов недостатньої кількості маркованих реальних зразків. Окремо подано постановку задачі ідентифікації дефектів як задачі класифікації станів пікселів з подальшою сегментацією областей дефекту, для чого визначено систему ознак, релевантних для розпізнавання. Наведено обґрунтування вибору

функцій втрат, порогів прийняття рішень, методів нормалізації та підготовки зображень до подачі в модель глибокого навчання. Цей розділ закладає теоретичну основу запропонованої технології контролю якості, забезпечуючи математичну формалізацію процесу аналізу зображень і створюючи підґрунтя для побудови нейромережевої моделі. Автор демонструє високий рівень володіння засобами математичного моделювання, необхідними для побудови інформаційно-вимірювальних систем.

Третій розділ присвячено розробці нейромережевої моделі ідентифікації дефектів у виробі адитивного виробництва на основі аналізу графічної інформації. На підставі результатів математичного моделювання, викладених у попередньому розділі, автор формує архітектуру згорткової нейронної мережі, яка здатна виявляти дефектні зони за піксельною інтенсивністю, текстурними особливостями та локальними змінами структури. З урахуванням особливостей задачі, обґрунтовано вибір архітектури із подальшою адаптацією для роботи з високороздільними зображеннями. Описано процес формування навчальної вибірки, що включає як синтетично згенеровані, так і реальні зображення зразків полімерних виробів, виготовлених на основі 3D-друку. Використання таких даних на основі раніше побудованих фізико-математичних моделей дозволило компенсувати нестачу репрезентативного обсягу дефектних зразків. Застосовано підходи до розширення вибірки, включаючи повороти, масштабування, зміну контрасту та освітлення, що підвищило узагальнюючу здатність моделі. Описане детальне налаштування архітектури мережі, вибору гіперпараметрів (кількості шарів, функцій активації, типу пулінгу, параметрів оптимізатора). Розглянуто порівняння ефективності декількох моделей на різних наборах даних, включно з власноруч зібраними зразками. Як функцію втрат було обрано варіант модифікованої крос-ентропії, з урахуванням дисбалансу класів, характерного для задач виявлення дрібних дефектів на фоні великих однорідних ділянок. У розділі також наведено результати навчання та валідації моделі. Зазначено, що найкращих результатів вдалося досягти при комбінуванні синтетичних і реальних даних, що підтверджує доцільність використання моделювання як інструменту підтримки глибокого навчання. Розроблена модель виявила здатність адаптуватися до варіативності параметрів друку та геометрії об'єктів. Сформовано інтелектуальний модуль системи контролю якості, що є ключовим елементом запропонованої інформаційно-вимірювальної технології. Результати підтверджують ефективність інтеграції глибокого навчання у процеси технічного зору в умовах адитивного виробництва, що має велике значення для створення автономних і надійних систем виробничого контролю.

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячено експериментальній перевірці ефективності запропонованої інформаційно-вимірювальної технології, впровадженню її окремих компонентів у реальні виробничі процеси та оцінці точності виявлення дефектів. Автор описує організацію експериментального

стенду з використанням 3D-принтера та додатковими освітлювальними модулями, що імітують виробниче середовище. Це дозволило здійснити комплексну перевірку функціонування всієї системи в умовах, наближених до реальних. У рамках експериментів було надруковано понад 30 зразків із навмисно створеними дефектами різного типу (міжшарові зміщення, локальні перегріву, тріщини тощо), які було зафіксовано за допомогою камери в реальному часі. Автор порівнює результати роботи запропонованої нейромережевої моделі з візуальною оцінкою фахівців і з класичними алгоритмами аналізу зображень, демонструючи перевагу запропонованого підходу за показниками точності, повноти та швидкості опрацювання. Наведено аналіз продуктивності системи в реальному часі. Запропонована система виявила дефекти на етапі їхнього формування, що дозволило здійснювати динамічну зупинку або корекцію процесу. Описано впровадження компонентів системи у процес виготовлення елементів для безпілотних літальних апаратів і вузлів енергетичних систем, що підтверджується актами впровадження.

У висновках дисертаційної роботи підбито підсумки проведеного дослідження та сформульовано основні наукові й прикладні результати, які підтверджують досягнення поставленої мети.

Робота відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії та демонструє високий рівень наукової зрілості здобувача.

Оцінка рівня публікацій здобувача. За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 9 наукових праць, серед яких 1 публікація у наукових виданнях, проіндексованих в наукометричній базі SCOPUS, 3 публікації, які входять до наукової періодики (фахові видання, категорія Б). Апробацію матеріалів дисертації засвідчено у 5 публікаціях матеріалів міжнародних та вітчизняних наукових та науково-практичних конференцій.

Основні наукові результати, отримані автором дисертації, наведено у наукових працях, поданих у списку публікацій.

Новизна представлених теоретичних та/або експериментальних результатів проведених здобувачем досліджень. У дисертації Романенка В. В. отримано низку нових наукових результатів, що мають як теоретичне, так і прикладне значення у сфері інформаційно-вимірвальних технологій, зокрема в задачах контролю якості продукції адитивного виробництва. До нових теоретичних результатів слід віднести:

– побудовано узагальнену математичну модель формування зображення об'єкта у процесі 3D-друку з урахуванням оптичних, геометричних та технологічних параметрів друку, що дало змогу моделювати появу дефектів на етапі їх утворення;

– розроблено методіку генерації синтетичних навчальних вибірок на основі фізико-математичного моделювання, що істотно знижує потребу у великих обсягах вручну маркованих даних для тренування нейронних мереж;

– обґрунтовано вибір архітектури глибокої нейронної мережі для сегментації дефектних ділянок на зображеннях у реальному часі, з урахуванням специфіки топології полімерних виробів і умов друку.

До нових практичних результатів належать:

– реалізовано інформаційно-вимірвальну систему контролю якості, здатну виявляти дефекти на ранніх стадіях 3D-друку шляхом аналізу відеопотоку із вбудованої камери принтера;

– проведено масштабні експериментальні випробування системи на більш ніж 100 зразках із різними типами штучно створених дефектів, що дозволило підтвердити високу точність (до 97%), специфічність і швидкість запропонованої технології;

– запропоновано метод адаптації моделі до змін умов друку, що забезпечує стійкість системи в реальних виробничих середовищах.

Одержані Романенком В.В. результати суттєво розширюють науково-методичний апарат у галузі інтелектуального неруйнівного контролю якості продукції, що виготовляється методом адитивного виробництва, та мають перспективу подальшого розвитку в контексті побудови замкнених автономних систем контролю і регулювання.

Наукова обґрунтованість представлених результатів здобувача. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується коректною постановкою завдань дослідження, використанням перевірених на практиці методів дослідження та комплексним аналізом отриманих результатів моделювання, перевіркою розроблених моделей у розрахунках на даних ретроспективного періоду, а також підтверджуються практичним використанням, обговоренням на міжнародних конференціях та публікаціями у фахових виданнях. Сумнівів щодо достатності наукової обґрунтованості результатів немає. Висновки дисертаційної роботи є повними, логічними і відображають її цілісність та сутність.

Рівень виконання поставленого наукового завдання. У даній дисертаційній роботі поставлене наукове завдання – розробка адаптивної інформаційно-вимірвальної технології контролю якості виробів адитивного виробництва – виконано на високому науково-методичному та інженерному рівні. Дисертант послідовно пройшов усі етапи дослідження: від глибокого аналізу сучасного стану проблеми та постановки задачі – до створення математичних моделей, розробки нейромережових алгоритмів, реалізації експериментального стенду та підтвердження ефективності запропонованих рішень в умовах наближених до реального виробництва. Завдання сформульовано чітко, його структура відповідає логіці наукового пошуку. Автор продемонстрував здатність поєднувати методи математичного моделювання з практичною реалізацією алгоритмів опрацювання зображень і сучасними підходами до глибокого навчання. Обрані методи адекватні складності задачі, а результати – валідовані за допомогою експериментальних перевірок і порівняння з існуючими методами.

Здійснена інтеграція отриманих результатів у прикладні задачі та їх успішне впровадження у виробничих умовах, що свідчить не лише про завершеність теоретичних розробок, а й про реальну ефективність запропонованої системи. Таким чином, наукове завдання, поставлене у дисертації, повністю реалізовано, а його результати є вагомим внеском у розвиток інформаційно-вимірювальних технологій у сфері адитивного виробництва.

Рівень оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності. Автор впевнено володіє методами формалізації технічних задач, побудови математичних моделей складних процесів, а також сучасними інструментами збору, аналізу, опрацювання та інтерпретації експериментальних даних. У дисертації послідовно реалізовано повний цикл наукового дослідження: виявлено актуальну науково-прикладну проблему, сформульовано гіпотези, побудовано відповідні моделі, реалізовано експериментальну перевірку та проведено критичний аналіз отриманих результатів. Здобувач аргументовано обирає відповідні теоретичні та практичні методи, застосовує їх системно й уміло інтегрує міждисциплінарні підходи — від опрацювання візуальної інформації до нейромережевого навчання та метрологічного забезпечення.

Відомості про дотримання академічної доброчесності. У дисертації Романенка В.В. фактів академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації отриманих результатів, не виявлено. Дисертація Романенка В.В. 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 (із змінами).

Недоліки та зауваження до роботи. Попри високий рівень наукової новизни, завершеності та практичної значущості дисертації Романенка В. В., робота не позбавлена окремих недоліків та зауважень, які варто врахувати у подальшій науковій діяльності здобувача:

1. Структура викладу матеріалу в деяких розділах потребує уточнення: зокрема, в другому розділі місцями поєднуються елементи постановки задачі, формалізації та прикладного аналізу, що ускладнює логічне сприйняття матеріалу. Доцільно було б чіткіше розмежувати теоретичну модель і застосування до конкретного випадку.

2. Опис алгоритмів глибокого навчання подано без достатнього порівняльного аналізу альтернатив, зокрема, не розглянуто можливості застосування трансформерних архітектур або легших моделей типу MobileNet для вбудованих систем. Такий аналіз міг би зміцнити аргументацію обраного підходу.

3. В описі нейромережевих моделей трапляються незначні неточності у термінології (наприклад, терміни «глибина шару» і «кількість нейронів» іноді використовуються без чіткої різниці між ними). Це не знижує наукової цінності,

однак потребує уважнішого редакторського опрацювання.

4. При викладенні матеріалу, що стосується експериментального аналізу бракує детального опису метрологічної оцінки точності вимірювання геометричних елементів на зображенні, зокрема – впливу параметрів камери, роздільної здатності й частоти кадрів на якість ідентифікації дефектів. Додатковий метрологічний супровід підвищив би обґрунтованість висновків.

5. У ряді місць автор допускає певне дублювання змісту, наприклад, повторюється опис етапів підготовки навчальних вибірок у другому й третьому розділах.

Наведені недоліки дисертаційної роботи Романенка В.В. не є вирішальними та не зменшують її наукової цінності і значення отриманих результатів.

Висновки щодо дисертаційної роботи. Дисертація Романенка В.В. «Інформаційно-вимірювальна технологія контролю якості виробів адитивного виробництва» є завершеною науковою працею, в якій розв'язано наукове завдання, що має важливе значення для формування стійких трендів розвитку методології неруйнівного контролю виробів адитивного виробництва.

Основні результати дисертації Романенка В.В. повністю відображені в 4 опублікованих наукових працях, серед яких 3 статті у наукових фахових виданнях України та 1 публікація у наукових виданнях, проіндексованих в наукометричній базі SCOPUS. Апробацію матеріалів дисертації засвідчено у 5 публікаціях матеріалів міжнародних та вітчизняних наукових та науково-практичних конференцій. Автором отримане свідоцтво на авторське право (комп'ютерна програма, яка є складником розробленої інформаційно-вимірювальної технології).

Вважаю, що Романенко Владислав Володимирович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 175 «Інформаційно-вимірювальні технології».

Рецензент:

провідний науковий співробітник
відділу моніторингу і діагностики
об'єктів енергетики Інституту загальної
енергетики НАН України
докт. техн. наук, професор

 Юрій КУЦ

Підпис Куца Ю.В. засвідчую
завідувач відділу кадрів Інституту
загальної енергетики НАН України,



 Ірина ЛЮБЧЕНКО