

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.

3D-друк – це один з напрямків сучасних технологій, який дуже активно розвивається завдяки можливості виготовлення деталей об'єктів і систем, які мають складні геометричні форми. Актуальність дисертаційного дослідження Романенка В.В. зумовлена як світовими тенденціями розвитку технологій цифрового виробництва, так і нагальними потребами промисловості у впровадженні сучасних методів контролю якості. Зокрема, стрімкий розвиток адитивного виробництва, зокрема 3D-друку, зумовлює необхідність створення ефективних інформаційно-вимірювальних систем, здатних забезпечити автоматизовану, точну та адаптивну оцінку якості продукції в реальному часі. Відсутність належного контролю якості є одним із головних бар'єрів для інтеграції 3D-друку в серійне виробництво елементів критичної інфраструктури, зокрема в галузях енергетики, приладобудування і медицини. У цьому контексті особливої значущості набуває розробка новітніх інформаційно-вимірювальних технологій, які поєднують методи комп'ютерного зору, математичного моделювання, обробки сигналів та елементів штучного інтелекту для підвищення ефективності моніторингу. Актуальність дослідження також визначається необхідністю створення відкритих, доступних і гнучких інструментів контролю, що дозволяють вбудовувати системи технічного зору без значних витрат у структуру наявних виробничих процесів.

Запропонована інформаційна технологія може застосовуватися, наприклад, у системах внутрішньої самодіагностики 3D-принтерів як побутового, так і промислового рівня, що дозволить автоматично виявляти дефекти без втручання оператора, зменшуючи втрати матеріалу та часу. У сфері біоінженерії розроблені алгоритми можуть забезпечити контроль якості при друку біоматеріалів, де критично важливою є точність геометрії та однорідність шарів. Крім того, результати дисертації можуть бути адаптовані для задач технічного контролю у військово-промисловому комплексі, де 3D-друк застосовується для виготовлення малогабаритних функціональних елементів дронів, роботизованих систем або електронних корпусів, а виявлення мікропошкоджень ще на ранньому етапі виробництва є вирішальним для забезпечення надійності. У навчальному процесі створені програмно-апаратні рішення можуть бути використані для автоматизованої перевірки моделей, виготовлених студентами на заняттях із цифрового

виробництва, що сприятиме підвищенню якості засвоєння практичних навичок. У перспективі запропоновані технології можуть бути масштабовані до створення хмарних сервісів віддаленого контролю якості друку, що дозволить централізовано здійснювати моніторинг 3D-виробництва у розподілених виробничих середовищах. Адаптація розроблених алгоритмів можлива і для суміжних технологічних процесів, зокрема у литті пластмас, фрезеруванні або нанесенні тонких плівкових шарів, де також необхідний візуальний контроль форми, структури поверхні або цілісності шару. Таким чином, результати дисертаційної роботи мають міжгалузевий потенціал та можуть бути інтегровані у широкий спектр сучасних виробничих і навчальних практик.

Результати досліджень здобувача отримані в рамках виконання робіт відповідно до тематичного плану наукових досліджень Інституту загальної енергетики НАН України:

- науково-дослідна робота ІЗЕ-2024/1 (КПКВК 6541230, №ДР 0124U000005Д);
- науково-дослідна робота (№ДР0225U000422) «Розроблення інформаційно-виміральної системи моніторингу технічного стану сонячних електростанцій».

Отже, тема дисертаційної роботи є своєчасною, глибоко вмотивованою як з наукової, так і з прикладної точок зору, а також узгодженою з національними програмами науково-технічного розвитку. Робота сприяє розв'язанню актуального прикладного завдання – створення адаптивної інформаційно-виміральної технології для моніторингу якості в умовах адитивного виробництва.

Оцінка наукового рівня дисертації. Робота відзначається високим науковим рівнем виконання. Автор продемонстрував здатність до самостійного наукового мислення, володіння сучасним інструментарієм математичного моделювання, опрацювання зображень, методів штучного інтелекту, а також навичками апаратно-програмної інтеграції. У роботі запропоновано цілісну концепцію побудови інформаційно-виміральної технології для контролю якості виробів адитивного виробництва, що включає побудову математичних моделей, розробку архітектури системи, реалізацію алгоритмів комп'ютерного зору та розроблення прототипу технічного засобу. Усі етапи дослідження виконані послідовно, із чіткою постановкою задач, обґрунтуванням вибору методів і технічних рішень, а також із верифікацією отриманих результатів.

Основні положення дисертаційної роботи викладено на 162 сторінках, включаючи вступ, чотири розділи з висновками до кожного з них, загальні висновки, список використаних джерел і вісім додатків. Основна частина дисертації займає 123 сторінки друкованого тексту. Дисертаційна робота містить 14 таблиць і 61 рисунок. У списку використаних джерел нараховується 109 найменувань.

Перший розділ дисертації присвячено аналізу сучасного стану проблеми контролю якості в адитивному виробництві та обґрунтуванню вибору методологічної основи для побудови інформаційно-виміральної технології. У цьому розділі систематизовано підходи до класифікації технологій адитивного виробництва, зокрема розглянуто переваги та обмеження найбільш

поширених методів – FDM, SLA, SLS та інших. Детально охарактеризовано джерела виникнення дефектів у процесі 3D-друку, зокрема пов'язані з похибками механічного позиціонування, змінами температурного режиму, варіаціями швидкості екструзії, деформаціями матеріалу тощо.

У роботі проведений короткий огляд методів неруйнівного контролю, які застосовуються для виявлення дефектів у виробках, виготовлених з використанням адитивних технологій. Розглянуто оптичні, акустичні, термографічні та рентгенографічні методи з акцентом на їхні переваги, недоліки та сферу застосування. Виявлено, що хоча зазначені методи демонструють високу точність, вони часто є затратними, повільними або складними в реалізації у процесі виробництва, особливо для невеликих або настільних 3D-принтерів. Проаналізовано існуючі підходи до побудови систем технічного зору, які використовуються для виявлення дефектів під час друку або після завершення виготовлення виробу. Наведено приклади таких систем у наукових дослідженнях, що охоплюють аналіз зображень у видимому спектрі, використання алгоритмів сегментації, виявлення контурів, а також застосування глибоких згорткових нейронних мереж. Виявлено, що найперспективнішими є підходи, що дозволяють здійснювати моніторинг у режимі реального часу без втручання оператора, із можливістю зворотного впливу на технологічний процес. У розділі також проведено критичний огляд засобів, що базуються на нейромережевих методах і технологіях для задач класифікації зображень і виявлення аномалій у технічних об'єктах. Узагальнено результати досліджень щодо застосування згорткових штучних нейронних мереж у галузі інспекції 3D-друку. Визначено, що незважаючи на високий потенціал цих методів, значна частина публікацій не містить системної адаптації моделей до специфіки зображень, отриманих під час адитивного виробництва з різним рівнем освітленості, тіней та завад.

У підсумку першого розділу зроблено висновок про доцільність створення нової інформаційно-виміральної технології, яка б поєднувала методи машинного зору, алгоритми попередньої обробки зображень та глибокого навчання, здатної працювати в умовах змінного середовища і забезпечувати високу точність виявлення дефектів. Обґрунтовано вибір предметної області дослідження та сформульовано основні наукові завдання, які вирішуються в наступних розділах дисертації.

У *другому* розділі дисертаційної роботи досліджено та реалізовано математичні моделі, а також рішення, що забезпечують контроль якості процесів 3D-друку на основі комп'ютерного зору в реальному часі. Автор дисертаційного дослідження вирішує актуальне завдання нерівномірного освітлення при аналізі зображень процесу друку, що є критичним фактором, який значно ускладнює подальшу обробку кадрів, знижує точність аналізу та розпізнавання дефектів, особливо в умовах виготовлення об'єктів складної геометрії. Показано вплив освітлення на якість візуального моніторингу 3D-друку, зокрема описано складність підтримання стабільної світлової обстановки в робочому просторі принтера. Встановлено, що класичні методи зменшення впливу освітленості, такі

як гістограмна корекція або адаптивне згладжування, не забезпечують необхідного рівня точності в контексті оперативного виявлення дефектів. В результаті було сформульовано задачу вирівнювання інтенсивності пікселів з метою покращення однорідності кадрів, отриманих під час друку. Викладено формальну постановку задачі вирівнювання яскравості пікселів. Автор запропонував математичну модель, яка ґрунтується на рівнянні Пуассона – класичному рівнянні еліптичного типу, яке використовується в обробці зображень для вирівнювання освітлення з одночасним збереженням країв та контрастних деталей. Задача вирівнювання інтенсивності трансформується в задачу знаходження гармонійної функції, що мінімізує локальні коливання яскравості. Підкреслено, що подібна постановка забезпечує високу точність та відновлення ключових особливостей зображення, необхідних для подальшого аналізу. Наведено чисельний метод розв'язання поставленої задачі, який ґрунтується на дискретизації рівняння Пуассона за допомогою методу кінцевих різниць. Розроблено ефективний ітераційний алгоритм, який дозволяє швидко обробляти кадри з високою роздільною здатністю в реальному часі. Проведений аналіз збіжності та стабільності обчислень. Запропоновано загальну архітектуру програмного забезпечення, яке реалізує запропонований алгоритм у рамках інформаційно-вимірювальної технології. Програмне середовище побудовано з урахуванням вимог до швидкодії, гнучкості інтеграції з апаратними засобами та можливості масштабування. Надано блок-схеми основних модулів, описано інтерфейси взаємодії з камерою спостереження, обчислювальним ядром та нейромережею, яка здійснює наступну стадію – розпізнавання дефектів. У висновках до розділу обґрунтовано, що запропонована математична модель і реалізований програмний засіб забезпечують ефективне вирівнювання освітлення в кадрах друку, що значно підвищує якість попередньої обробки зображень. Це дозволяє зменшити рівень помилкових спрацьовувань під час виявлення дефектів, зокрема пропусків матеріалу, зміщення шарів, деформацій тощо. Таким чином, розроблена система забезпечує підвищення надійності процесу друку, особливо для об'єктів зі складною геометрією та підвищеними вимогами до точності.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячено комплексному експериментальному дослідженню ефективності розробленої інформаційно-вимірювальної технології контролю якості виробів, виготовлених методами адитивного виробництва. Розділ зосереджений на практичному впровадженні запропонованих рішень, а також на їх валідації шляхом виготовлення, тестування та аналізу спеціально розроблених дослідних зразків. У розділі обґрунтовано вибір полімерних матеріалів, що використовуються для створення зразків. Ключовими критеріями відбору виступають фізико-механічні характеристики, зокрема ударна в'язкість, термостійкість, гнучкість, радіопрозорість та електромагнітна інертність, що є особливо важливими для виробів, призначених для використання у конструкціях БпЛА. Автор порівнює низку матеріалів (ABS, PLA, PETG тощо), підкреслюючи, що лише оптимальне поєднання властивостей дає змогу досягти високої надійності та стабільності виробів. З використанням сучасних CAD/CAM-систем сформовано цифрові моделі з

різними геометричними параметрами та внутрішніми структурами для створення контрольованих умов, у яких можуть виникати типові дефекти. Проекти враховують можливість змішування полімерів, що потребувало модифікації класичних моделей і адаптації їх до характеристик змішаних матеріалів. Також у розділі наведені математичні моделі змішування полімерів з урахуванням нелінійної залежності фізичних властивостей від складу. Розроблено модель оптимізації рецептури змішування на основі критерію максимізації показників міцності та стабільності при мінімізації вартості. Розроблено моделі взаємодії компонентів полімерної суміші в екструдері на основі нелінійного програмування. Автором було дотримано методологічних вимог до досліджень, результати підтвердили наявність дефектів у зразках із порушенням режимів друку – саме ці приклади стали ключовими для валідації нейромережевої моделі.

Четвертий розділ дисертації присвячено узагальненню реалізованої інформаційно-вимірювальної технології для контролю якості виробів адитивного виробництва. Здійснено систематизацію та класифікацію всіх елементів інформаційно-вимірювальної технології. Запропоновано структурну модель, яка складається з: (1) системи відеоспостереження, що забезпечує безперервну зйомку процесу друку; (2) програмного модуля попередньої обробки кадрів (вирівнювання яскравості за рівнянням Пуассона); (3) блоку інтелектуального аналізу зображень на основі згорткової нейронної мережі; (4) керуючого контролера, що приймає рішення про продовження чи зупинку друку. Така архітектура є модульною, гнучкою та масштабованою, що дозволяє адаптувати її до різних типів принтерів та виробничих завдань. У роботі детально описано процедуру формування навчального набору для нейромережі, яка виконує розпізнавання дефектів. Автором сформовано базу зображень, що містить типові випадки порушення технологічного процесу: пропуски, розшарування, зсуви шарів, ефект «спагеті», деформації кутів тощо. Обґрунтовано, як оброблені кадри після вирівнювання освітленості підвищують якість навчання та знижують похибку класифікації. У розділі запропонована архітектура згорткової нейронної мережі, побудованої спеціально для завдання розпізнавання дефектів у реальному часі. Мережа включає кілька послідовних шарів згортки, пулінгу та активації, що дозволяє ефективно виявляти локальні ознаки дефектів. Автор оптимізує глибину мережі, кількість фільтрів та параметри регуляризації з урахуванням обмежень на обчислювальні ресурси (зокрема, в умовах встановлення на малопотужні вбудовані системи). Запропонована структура забезпечує високу точність при низькій латентності. Виконаний опис механізмів взаємодії між апаратними та програмними модулями. Розглянуто способи синхронізації кадрів із камери з циклом обробки в нейромережі, а також реагування системи на виявлені дефекти: подача сигналу зупинки друку, реєстрація інцидентів, інформування оператора.

Автор здійснює експериментальну перевірку ефективності системи на різних типах зразків із контрольованими дефектами. Подано числові показники точності класифікації (до 94%), повноти

(до 91%) та F1-міри. Порівняльний аналіз з аналогічними комерційними та дослідницькими системами показав перевагу запропонованого підходу в точності розпізнавання дефектів на 3–5%, а також в енергоефективності та адаптивності. Експериментально доведено здатність системи виявляти дефекти на ранній стадії формування, що дозволяє вчасно реагувати й уникати друку браку.

У висновках дисертаційної роботи підсумовано результати проведеного дослідження та сформульовано основні наукові й прикладні здобутки, що підтверджують досягнення поставленої мети. Автором узагальнено розробку інформаційно-вимірювальної технології автоматизованого контролю якості виробів адитивного виробництва, яка поєднує методи математичного моделювання, аналізу візуальних даних та нейромережевого навчання.

Оцінка рівня публікацій здобувача. В рамках виконання дисертаційного дослідження оприлюднено 9 наукових праць, зокрема: одну статтю в науковому виданні, індексованому в міжнародній наукометричній базі Scopus, три публікації у фахових наукових виданнях України, що входять до переліку наукової періодики категорії Б, а також п'ять матеріалів виступів на міжнародних і національних наукових та науково-практичних конференціях. Апробація основних результатів дослідження відбулася через їх представлення на відповідних наукових заходах.

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

- уперше 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;
- уперше реалізовано інформаційно-вимірювальну систему контролю якості, здатну виявляти дефекти на ранніх стадіях 3D-друку шляхом аналізу відеоданих;
- запропоновано методику 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;
- запропоновано метод адаптації моделі до змін умов друку, що забезпечує стійкість системи в реальних виробничих середовищах;
- проведено експериментальні випробування системи на зразках із різними типами штучно

створених дефектів, що дозволило підтвердити високу точність (до 97%), специфічність і швидкість запропонованої технології.

Результати, отримані Романенком В.В., істотно доповнюють науково-методичний інструментарій у сфері інтелектуального контролю якості продукції, виготовленої засобами адитивного виробництва, та відкривають перспективи для подальшого розвитку в напрямі створення замкнених автономних систем контролю і регулювання технологічних процесів.

Наукова обґрунтованість представлених результатів здобувача. Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертаційній роботі, вирізняються належним рівнем обґрунтованості та достовірності, що забезпечено чіткою постановкою дослідницьких завдань, використанням апробованих у практиці методів аналізу, а також системним опрацюванням результатів. Надійність отриманих моделей підтверджено їх перевіркою на основі ретроспективних даних, практичним застосуванням, представленням результатів на міжнародних наукових форумах і оприлюдненням у рецензованих фахових виданнях. Обґрунтованість наукових результатів не викликає сумнівів. Висновки дисертації є логічно послідовними, змістовно повними та відображають цілісність і сутність проведеного дослідження.

Рівень виконання поставленого наукового завдання. У дисертаційній роботі Романенка В.В. наукове завдання зі створення адаптивної інформаційно-виміральної технології контролю якості виробів адитивного виробництва вирішено на високому теоретичному та інженерному рівні. Дослідження охоплює повний цикл – від ґрунтового аналізу сучасного стану проблеми та формулювання дослідницької мети до побудови математичних моделей, розробки нейромережових алгоритмів, створення експериментального стенду та практичної перевірки ефективності запропонованих рішень в умовах, наближених до виробничих. Постановка завдання є чіткою та структурно узгодженою з логікою наукового пошуку. Автор продемонстрував вміння інтегрувати методи математичного моделювання з практичною реалізацією алгоритмів обробки зображень і застосуванням сучасних технологій глибинного навчання. Обрані методологічні підходи відповідають складності досліджуваної проблеми, а одержані результати підтверджено експериментально та порівняні з існуючими рішеннями, що засвідчує їхню валідність.

Рівень оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності. Автор демонструє впевнене володіння методами формалізації технічних задач, побудови математичних моделей складних технологічних процесів, а також сучасними засобами збору, аналізу, обробки та інтерпретації експериментальних даних. У дисертаційній роботі послідовно реалізовано повний цикл наукового дослідження: від постановки актуального науково-прикладного завдання й формулювання дослідницьких гіпотез до побудови відповідних моделей, проведення експериментальної перевірки та критичної інтерпретації отриманих результатів. Здобувач аргументовано обґрунтовує вибір теоретичних і практичних методів дослідження, системно їх

застосовує та ефективно поєднує міждисциплінарні підходи – від опрацювання візуальної інформації та методів навчання нейромережі до засобів метрологічного забезпечення.

Відомості про дотримання академічної доброчесності. У дисертаційній роботі Романенка Владислава Володимировича не виявлено фактів академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації результатів дослідження. Зміст та результати дослідження повністю відповідають вимогам, визначеним у «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. Робота містить деякі недоліки і зауваження, зокрема:

- 1) у дисертаційній роботі зустрічається термін «освітленість». Даний термін має фізичний зміст, його доцільно використовувати для оцінки реальних умов освітлення в приміщеннях, на вулиці, дослідженні кліматичних умов тощо. У контексті даного дисертаційного дослідження, враховуючи міждисциплінарний характер роботи, краще використовувати «яскравість» (в контексті пікселів і комп'ютерного зору загалом);
- 2) у розділі 2 здійснений опис граничних умов у математичній моделі препроцесингу «яскравості» пікселів з метою штучної зміни зображення, яке може містити дефект 3D-друку. У граничних умовах вказані границі «Left», «Right», «Up» і «Down», які не є коректними з математичної точки зору. Граничні умови потрібно вказувати математично, зокрема, вказавши конкретно область, на якій дана гранична умова задана;
- 3) з опису математичної моделі не зовсім зрозумілим є те, до чого саме застосовуються границі «Left», «Right», «Up» і «Down», які були вказані у попередньому зауваженні. Це границі всього зображення чи границі об'єкта, який досліджується камерою?
- 4) в розділі 2 у формулі (2.1) наведено параметр λ , який не описаний. Доцільно вказати, яка його суть, а також в яких одиницях він вимірюється (якщо, є очевидним, що це не є безрозмірною величиною).

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

Висновки щодо дисертаційної роботи. Дисертаційна робота Романенка Владислава Володимировича на тему «Інформаційно-вимірювальна технологія контролю якості виробів адитивного виробництва» є завершеним, самостійним і комплексним науковим дослідженням, яке відзначається високим рівнем наукової новизни, теоретичної глибини та значною прикладною спрямованістю. У межах дисертаційного дослідження вирішено актуальне наукове завдання розробки адаптивної інформаційно-вимірювальної технології, призначеної для моніторингу процесу 3D-друку та виявлення характерних дефектів на основі сучасних методів комп'ютерного зору та

інтелектуальної обробки зображень.

Здобувачем сформульовано та обґрунтовано концептуальні засади побудови інформаційно-вимірвальних систем з урахуванням викликів цифрової трансформації виробництва. Проведено системний аналіз джерел виникнення дефектів, класифіковано існуючі методи контролю, розроблено алгоритми попереднього опрацювання зображень та виявлення структурних порушень виробів. Практична реалізація запропонованих рішень здійснена у вигляді діючого програмно-апаратного прототипу, що забезпечує адаптацію системи до умов конкретного виробничого середовища.

Результати дослідження підтверджено апробацією в реальних умовах – під час виготовлення компонентів для технічних систем, у виробничій діяльності підприємств енергетичної галузей, а також в освітньому процесі.

Основні результати дисертаційного дослідження Романенка В.В. повністю відображені у чотирьох опублікованих наукових працях, серед яких три статті у фахових наукових виданнях України та одна публікація у виданні, що індексується в наукометричній базі SCOPUS. Матеріали дисертації були апробовані й представлені у п'яти публікаціях, опублікованих за матеріалами міжнародних та вітчизняних наукових і науково-практичних конференцій. Автор також отримав свідоцтво на авторське право щодо комп'ютерної програми, яка є складовою частиною розробленої інформаційно-вимірвальної технології.

Вважаю, що за своєю актуальністю, науковим рівнем, обґрунтованістю висновків і ступенем впровадження одержаних результатів дисертаційна робота відповідає вимогам, встановленим до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії, а її автор, Романенко Владислав Володимирович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 175 – Інформаційно-вимірвальні технології.

Рецензент:

Старший науковий співробітник відділу
моніторингу і діагностики об'єктів енергетики
комплексу Інституту загальної енергетики
НАН України
докт. техн. наук, старший дослідник



Олег ДЕКУША

Підпис Декуши О.Л. засвідчую
заступник завідувача відділу кадрів Інституту
загальної енергетики НАН України



Наталія БУЛКА