

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Романенка Владислава Володимировича

«Інформаційно-вимірювальна технологія контролю якості виробів

адитивного виробництва»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 175 – Інформаційно-вимірювальні технології

Актуальність теми дисертації. Інтенсивний розвиток технологій адитивного виробництва зумовлює потребу в створенні нових засобів забезпечення якості виготовлених виробів. Це особливо актуально для високоточних і відповідальних галузей, таких як авіаційна промисловість, медицина, енергетика, де помилки в геометрії чи структурі матеріалу можуть мати критичні наслідки. На цьому тлі значно зростає потреба у засобах виявлення дефектів у режимі реального часу, що дає змогу оперативного втручання у виробничий процес і запобігати виготовленню бракованої продукції.

У сучасних умовах 3D-друк стає не лише методом прототипування, а й повноцінною виробничою технологією, яка застосовується у серійному виготовленні елементів складної геометрії, зокрема в енергетиці, оборонній галузі та авіаційній промисловості. Одним із ключових викликів, що обмежує поширення адитивних технологій у критичних сферах, є відсутність ефективних засобів контролю якості друку у реальному часі.

Сучасні підходи до контролю якості в адитивному виробництві переважно є постфактум-орієнтованими або вимагають значної участі оператора, що не відповідає вимогам автоматизованих та безперервних виробничих процесів. Саме тому виникає об'єктивна потреба у побудові інформаційно-вимірювальної технології, здатної інтегрувати апаратно-програмні засоби опрацювання відеоданих, методи комп'ютерного зору та штучного інтелекту для виявлення дефектів у процесі друку. Дослідження присвячене розробленню нової інформаційно-вимірювальної технології (ІВТ) для контролю якості у процесі 3D-друку. Вибір теми дисертації продиктований сучасними потребами промисловості, а її реалізація відкриває нові можливості для ефективного моніторингу якості виробів у цифровому виробничому середовищі.

Саме тому актуальність роботи Романенка В.В. зумовлена необхідністю розробки й реалізації адаптивної, інтелектуальної ІВТ, яка дозволить забезпечити

підвищення надійності, безперервності та технологічної якості процесів адитивного виробництва відповідно до викликів сучасної промисловості.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертаційній роботі Романенка В.В. отримано низку науково обґрунтованих результатів, які суттєво доповнюють і розвивають сучасні уявлення про методи забезпечення якості в адитивному виробництві за допомогою інтелектуальних ІВТ.

До основних результатів, які визначають наукову новизну дослідження, належать:

– уперше розроблено математичну модель вирівнювання інтенсивності пікселів на зображеннях виробів, що отримуються у процесі 3D-друку, яка дозволяє здійснювати попереднє опрацювання вхідних даних з метою зменшення впливу нерівномірного освітлення на точність аналізу кадрів та виявлення дефектів у реальному часі;

– удосконалено інформаційно-вимірювальну технологію контролю якості об'єктів адитивного виробництва шляхом поєднання процедур стандартизації та нормалізації зображень із вбудованими модулями штучного інтелекту, що підвищує ефективність розпізнавання типових дефектів (зсув шарів, розшарування, пропуски матеріалу тощо) у режимі онлайн;

– удосконалено методи наближеного розв'язання рівнянь математичної фізики еліптичного типу, що лежать в основі препроцесингу графічних об'єктів і використовуються для підвищення якості зображень перед передачею їх до нейромережевої моделі класифікації;

– отримав подальший розвиток метод інтелектуального препроцесингу графічних об'єктів, що передбачає нормалізацію та стандартизацію зображень перед їх морфологічним та статистичним аналізом.

Крім того, автором удосконалено методики опрацювання зображень та алгоритми сегментації на основі контурного аналізу. Ці розробки сприяють підвищенню надійності діагностики дефектів у реальному часі. Також у роботі реалізовано оригінальну концепцію апаратно-програмного комплексу з інтеграцією нейромережевого опрацювання та попереднього аналітичного аналізу, що дозволяє застосовувати технологію у промислових умовах.

Зазначені результати становлять вагомий внесок у розвиток ІВТ у сфері адитивного виробництва та комп'ютерного зору. Вони мають перспективу для подальшого вдосконалення систем технічного контролю якості на основі штучного інтелекту.

Наукова новизна дисертації полягає в інтеграції сучасних математичних, алгоритмічних та апаратно-програмних засобів в єдину ІВТ, яка є інноваційним підходом до автоматизованого контролю якості продукції адитивного виробництва з урахуванням викликів промислової практики.

Ступінь обґрунтованості та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій. Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертаційній роботі Романенка В.В., є обґрунтованими, логічно послідовними та підтвердженими як теоретичними, так і експериментальними результатами. Обґрунтованість висновків забезпечується комплексним підходом до дослідження, що охоплює математичне моделювання, чисельні експерименти, розробку апаратно-програмного забезпечення та аналіз його ефективності на реальних зразках. Автор послідовно обґрунтовує доцільність побудови ІВТ для контролю якості у процесах 3D-друку, демонструючи зв'язок між теоретичними моделями та практичними задачами. Зокрема, математична модель вирівнювання яскравості пікселів та нейромережева система розпізнавання дефектів пройшли етапи валідації, тестування та впровадження у прикладні задачі (виготовлення БпЛА та елементів енергетичного обладнання).

Достовірність отриманих результатів підтверджується використанням адекватних наукових методів: системного аналізу, методів машинного навчання, нелінійного програмування, а також порівнянням результатів автоматизованого аналізу з результатами візуального контролю та експериментальних випробувань зразків. Публікації у фахових виданнях та апробація результатів на міжнародних конференціях також свідчать про достовірність та актуальність наукових положень дисертації. Сукупність теоретичних обґрунтувань, емпіричних даних та апробованих прикладних рішень дозволяє стверджувати, що наукові результати є достовірними, методологічно виваженими і придатними до практичного застосування.

Дисертаційна робота має високий рівень методологічної обґрунтованості. Варто зазначити, що результати дослідження підтверджено випробуваннями на реальних 3D-принтерах у лабораторних і напівпромислових умовах, що забезпечує практичну перевірку достовірності всіх положень. Узагальнення результатів дослідження виконано з дотриманням принципів наукової доброчесності.

Апробація та повнота опублікування результатів роботи. Основні наукові результати, отримані у дисертаційній роботі Романенка В.В., пройшли

всебічну апробацію на авторитетних наукових форумах, що підтверджує їх наукову та практичну значущість. Матеріали дисертації були представлені на низці всеукраїнських та міжнародних конференцій, зокрема:

- 3rd International Scientific and Practical Conference “European Congress of Scientific Achievements” (Іспанія, 2024);
- 9th International Scientific and Practical Conference “Current Challenges of Science and Education” (Німеччина, 2024);
- ІРТК-2024 (Київ, 2024);
- Міжнародна конференція “Цифрові технології в енергетиці і автоматичі” (Київ, 2024);
- ХХХ Міжнародна конференція з проблем розвитку сучасної науки (Київ, 2025).

Публікаційна активність дисертанта відповідає вимогам до наукового рівня роботи. За темою дисертації опубліковано 9 наукових праць, з яких: 3 статті у фахових наукових виданнях України, 1 публікація у міжнародному виданні, що індексується в базі даних *Scopus*, 5 матеріалів у збірниках конференцій, отримано свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Комп’ютерна програма «Програмний модуль вирівнювання освітленості кадрів зображень для підвищення ефективності розпізнавання дефектів 3D-друку в режимі реального часу». Усі публікації повністю охоплюють основні положення дисертаційної роботи, зокрема теоретичне обґрунтування побудови ІВТ, математичне моделювання, реалізацію нейромережових алгоритмів, експериментальні дослідження, практичне впровадження у сфері 3D-друку. Це свідчить про високий ступінь відкритості результатів та їх відповідність вимогам академічної доброчесності.

Мова та стиль дисертації й автореферату. Робота написана на високому мовному рівні. Текст дисертації викладено грамотною науковою мовою, із дотриманням усіх вимог академічного стилю. Опис теоретичних положень, математичних моделей, методів та алгоритмів є чітким, структурованим та послідовним.

У дисертації використовуються професійні терміни та визначення відповідно до міжнародної практики у галузі інформаційно-вимірювальних технологій, комп’ютерного зору й штучного інтелекту.

Мова роботи сприяє легкому сприйняттю змісту, зокрема для спеціалістів із суміжних наукових напрямів, таких як автоматизація, метрологія, цифрове опрацювання сигналів тощо.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення результатів дисертаційної роботи Романенка Владислава Володимировича полягає у створенні ефективної інформаційно-вимірювальної технології для автоматизованого контролю якості виробів, виготовлених методом адитивного виробництва. Запропонована технологія дозволяє виявляти типові дефекти 3D-друку (розшарування, зсуви шарів, пропуски) в режимі реального часу, що суттєво підвищує надійність і безперервність виробничих процесів.

Результати дослідження впроваджено у низці реальних проєктів і виробничих умов. Зокрема, елементи системи були застосовані при створенні конструктивних деталей радіоелектронного обладнання БПЛА, що виготовлялися із спеціалізованих полімерних композитів із підвищеною радіопрозорістю. Це дало змогу уникнути втрат сигналів у НВЧ-діапазоні та покращити функціональні характеристики безпілотних платформ. Крім того, технологію реалізовано в освітньому процесі в межах підготовки фахівців за спеціальністю 122 – «Комп'ютерні науки», зокрема, при викладанні курсів «Комп'ютерна графіка» та «Методи та системи штучного інтелекту». Впроваджені алгоритми швидкого аналізу зображень, методи препроцесингу та машинного навчання підвищили ефективність засвоєння студентами сучасних інструментів комп'ютерного зору. Практичну значущість підтверджено також результатами впровадження в діяльність підприємств ТОВ «Промел Енергоавтоматика» та ТОВ НВП «Ультракон», де використано методи САД-моделювання та екструзії композитів для виготовлення елементів енергетичного та ультразвукового обладнання. Це сприяло оптимізації виробничих процесів і підвищенню якості кінцевої продукції.

Оцінка змісту дисертації, її відповідність спеціальності. Зміст дисертаційної роботи Романенка Владислава Володимировича повністю відповідає заявленій спеціальності 175 – Інформаційно-вимірювальні технології та напряму підготовки в галузі знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації. У роботі комплексно розкрито питання розробки, математичного обґрунтування, програмної реалізації та практичного впровадження ІВТ, орієнтованої на забезпечення якості у процесах адитивного виробництва.

У дисертації досліджено повний цикл формування ІВТ: від аналізу джерел похибок у 3D-друці та вибору технологічних параметрів до побудови моделей цифрової обробки зображень, верифікації методів виявлення дефектів та реалізації апаратно-програмного комплексу з функціями адаптивного

моніторингу. Значну увагу приділено методам комп'ютерного зору, нейромережевому аналізу та обробці даних у реальному часі — що безпосередньо пов'язано зі спеціальністю 175 та сучасними задачами технічного контролю.

Робота відзначається високим рівнем міждисциплінарності, поєднуючи знання з метрології, математичного моделювання, опрацювання зображень, машинного навчання та сучасних інформаційних технологій. Це дозволяє класифікувати дисертацію як таку, що не лише формально, а й змістовно належить до відповідної наукової спеціальності.

Недоліки та зауваження до дисертації. Незважаючи на високий рівень виконання дисертаційної роботи, слід звернути увагу на деякі незначні недоліки, які мають переважно формальний або рекомендаційний характер:

– у деяких розділах доцільним було б представити розширене порівняння з альтернативними підходами до контролю якості в адитивному виробництві, зокрема такими, як інфрачервона термографія, акустична емісія, ультразвуковий контроль та інші методи неруйнівного контролю. Включення експериментальних або аналітичних даних щодо порівняльної ефективності різних методів дозволило б глибше обґрунтувати вибір саме візуального підходу, а також окреслити можливості інтеграції різних систем моніторингу;

– опис апаратного забезпечення системи контролю якості, запропонованої у дисертації, потребує більш детального розкриття. Зокрема, бракує конкретизації характеристик сенсорів, камер, обчислювальних модулів, особливостей синхронізації із 3D-принтером тощо. Це важливо для практичного відтворення та незалежної оцінки працездатності створеної інформаційно-виміральної технології;

– у розділі 4 автор вказує, що для оцінки результатів навчання нейромережевої моделі було використано валідаційну множину, що складає 25% від набору навчальних даних. При цьому не використовується тестова множина, хоча обсяг набору даних є достатнім для її формування. Це викликає запитання щодо ефективності роботи нейромережі на абсолютно нових даних, які не використовувались під час процесу навчання та валідації;

– у підрозділі 4.1. використано поняття «точність класифікації», що є не зовсім коректним в контексті поставленої задачі. Правильніше було б оперувати поняттям «доля правильних відповідей» або «частка вірних класифікацій».

– окремі формулювання у висновках до розділів могли б бути більш орієнтованими на формулювання конкретних технічних результатів і

потенційних областей застосування та подальших шляхів розвитку розроблених рішень.

Зазначені зауваження не знижують загального позитивного враження від роботи та не впливають на її наукову цінність.

Загальна оцінка та висновки. Дисертаційна робота Романенка Владислава Володимировича на тему «Інформаційно-вимірювальна технологія контролю якості виробів адитивного виробництва» є завершеним науковим дослідженням, яке присвячено актуальній задачі створення інтелектуальної системи контролю якості в процесах 3D-друку. Робота вирізняється високим науково-технічним рівнем, глибоким теоретичним обґрунтуванням, наявністю практичних результатів, а також демонструє володіння здобувачем методологією наукової діяльності. У роботі реалізовано повний цикл розроблення та впровадження ІВТ: від побудови математичних моделей до створення та валідації прикладного програмного забезпечення. Результати дослідження мають як теоретичне, так і практичне значення, що підтверджено впровадженням у виробничі та освітні процеси, а також апробацією на наукових конференціях і публікаціями у фахових виданнях.

Дисертаційна робота відповідає вимогам до кваліфікаційних наукових праць на здобуття ступеня доктора філософії, встановленим Порядком присудження наукових ступенів, та оформлена згідно вимог наказу МОН від 12 січня 2017 р. № 40. За актуальністю, науковим рівнем, новизною та повнотою викладення результатів дослідження робота повністю відповідає спеціальності 175 – Інформаційно-вимірювальні технології.

З огляду на вище викладене, вважаю, що здобувач Романенко Владислав Володимирович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації за спеціальністю 175 – Інформаційно-вимірювальні технології.

Опонент:

старший викладач кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю КПІ ім. Ігоря Сікорського, доктор філософії (PhD)



A. Momo Андрій МОМОТ
Підпис гр. *Момот А. С.*
Засвідчується
Відділ кадрів та адміністративних питань
Підпис *Момот А. С.* *Момот А. С.*
арше