

## **ВИСНОВОК**

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації  
Романенка Владислава Володимировича  
на тему «ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ КОНТРОЛЮ  
ЯКОСТІ ВИРОБІВ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА»,  
що подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
з галузі знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»  
за спеціальністю 175 «Інформаційно-вимірювальні технології»**

Дисертаційну роботу Романенка Владислава Володимировича виконано у відділі моніторингу і діагностики об'єктів енергетики Інституту загальної енергетики НАН України.

Наукові результати дисертації розглянуто на засіданні розширеного наукового семінару відділу моніторингу і діагностики об'єктів енергетики Інституту загальної енергетики НАН України (протокол № 9 від 04.06.2025).

### **Актуальність теми дослідження**

У сучасних умовах цифровізації промисловості, зокрема швидкого розвитку технологій адитивного виробництва (3D-друку), значно зростають вимоги до якості, точності та надійності виготовлення виробів складної геометрії. Адитивні технології набувають особливого значення в галузях, що потребують високого рівня індивідуалізації продукції, зниження масогабаритних характеристик, мінімізації виробничих відходів та адаптації конструкцій до спеціальних умов експлуатації. Водночас головною перешкодою до повноцінного впровадження 3D-друку в серійне виробництво залишається проблема забезпечення автоматизованого, об'єктивного й безперервного контролю якості в реальному часі.

Існуючі підходи до верифікації результатів 3D-друку здебільшого передбачають ручний огляд, постфактум-аналіз або застосування дорогих інспекційних систем, що обмежує їхнє використання у промисловості. Це призводить до збільшення частки бракованої продукції, простоїв у виробництві та фінансових втрат. Особливо гостро ця проблема стоїть у таких галузях, як безпілотні системи, енергетика, біомедицина, де якість надрукованих компонентів безпосередньо впливає на функціональність і безпеку готових виробів.

У цьому контексті актуальним є створення універсальної, гнучкої та економічно доцільної інформаційно-вимірювальної технології, яка дозволить виявляти дефекти 3D-друку на ранніх етапах, автоматизовано коригувати процес друку та забезпечувати його неперервність. Поєднання методів комп'ютерного зору, штучного інтелекту (зокрема згорткових нейронних мереж) та чисельного моделювання відкриває нові перспективи в розробленні таких систем.

У розробці композитних полімерів, моделей полімерізації, практичного застосування отриманих полімерів в різних галузях науки й техніки, застосуванні штучного інтелекту у серійному адитивному виробництві присвячено роботи таких вчених, як Савченко Б.М., Слепцов О.О., Сова Н.В., Klippstein H., Hassanin H., Mukherjee T., Kao N., Zhang Y., Zhang Y., She W., Yang L., Liu G. та інших. Розробленням математичних та комп'ютерних моделей автоматизації процесів адитивного виробництва було присвячено низку робіт Davtalab O., Kazemian A., Yuan

X., Bisheh M.N., Chang S.I., Lei S., Nasiri S., Khosravani M.R., Oleff A., Küster B., Stonis M., Overmeyer L., Ashrafi N., Duarte J.P., Nazarian S., Meisel N.A. та ін.

Дослідження відомих авторів охоплюють окремі аспекти проблематики, пов'язані з методами, моделями та засобами забезпечення якості процесів адитивного виробництва. Водночас, у більшості випадків ці підходи не забезпечують комплексного вирішення завдання розроблення інтегрованої інформаційно-вимірювальної технології контролю якості продукції адитивного виробництва з урахуванням сучасних методів і алгоритмів штучного інтелекту. Зокрема, недостатньо уваги приділено формуванню високоякісних навчальних вибірок з типовими дефектами друку, які є критично важливими для ефективного навчання нейронних мереж. Побудова структурованої бази даних із достовірно класифікованими зразками дефектів забезпечує можливість створення прикладного програмного забезпечення, яке виступає ключовим компонентом запропонованої інформаційно-вимірювальної технології.

Нині існують аналоги, які мають змогу керувати процесами 3D-друку в ході виявлення типових дефектів, але усі ці аналоги не дають якісних результатів, оскільки до дослідження процесів адитивного виробництва потрібно підходити комплексно, зокрема, виконувати попереднє опрацювання візуальних даних перед побудовою нейромережевої технології розпізнавання типових дефектів друку. Тому удосконалення інформаційно-вимірювальної технології контролю якості виробів адитивного виробництва шляхом розроблення методів і моделей розпізнавання типових дефектів є актуальним науково-прикладним завданням.

#### **Мета та завдання дослідження**

Метою дисертаційного дослідження є удосконалення інформаційно-вимірювальної технології контролю якості виробів адитивного виробництва шляхом розроблення прикладного програмного забезпечення візуального контролю із застосуванням методів і засобів комп'ютерного зору і машинного навчання як сукупності теоретичного, алгоритмічного та апаратно-програмного забезпечення.

Для досягнення поставленої мети дослідження було сформульовано та вирішено такі завдання:

- розробити математичну модель вирівнювання інтенсивності пікселів у зображеннях, які отримуються в реальному часі в ході 3D-друку;
- розробити модель нейромережевого типу з метою ефективного (швидкого і точного) розпізнавання технологічних дефектів в ході процесу 3D-друку елементів складних об'єктів на ранній стадії їх виникнення;
- удосконалити (прискорити) методи наближених обчислень для пошуку розв'язку рівняння Пуассона, що використовується для поканального аналізу кадру в темпі їх отримання з камери;
- удосконалити інформаційно-вимірювальну технологію контролю якості виробів адитивного виробництва;
- програмно реалізувати розроблену математичну модель вирівнювання інтенсивності пікселів у кадрах, які отримуються в реальному часі в ході 3D-друку елементів, та виконати її валідацію;
- програмно реалізувати нейромережеву модель розпізнавання дефектів друку елементів у реальному часі, виконати її валідацію.
- реалізувати інформаційно-вимірювальну технологію контролю якості виробів адитивного виробництва.

**Об'єкт дослідження** – процеси друку об'єктів адитивного виробництва та забезпечення якості друку об'єктів складних геометричних форм.

**Предмет дослідження** – програмно-апаратні засоби і технології забезпечення якості процесів адитивного виробництва.

**Наукова новизна отриманих результатів, що розроблені дисертантом особисто**

У дисертаційній роботі Романенка Владислава Володимировича отримано нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності вирішують важливе науково-технічне завдання підвищення точності та надійності процесів адитивного виробництва шляхом розроблення й впровадження інформаційно-вимірювальної технології контролю якості на основі методів комп'ютерного зору та елементів штучного інтелекту. Наукова новизна роботи полягає в такому:

- уперше розроблено математичну модель вирівнювання інтенсивності пікселів у зображеннях виробів адитивного виробництва, яка дозволяє компенсувати ефекти змінного або нерівномірного освітлення під час візуального моніторингу процесу 3D-друку в реальному часі. Це забезпечує підвищення достовірності аналізу зображень та зменшення похибок розпізнавання дефектів;

- реалізовано функціональну інтеграцію апаратної та програмної частин у вигляді єдиної інформаційно-вимірювальної системи контролю якості виробів, яка здатна виявляти дефекти у режимі реального часу та ініціювати зупинку процесу друку в разі їх фіксації.

- удосконалено інформаційно-вимірювальну технологію контролю якості виробів адитивного виробництва шляхом інтеграції методів нормалізації та стандартизації зображень, а також шляхом використання згорткових нейронних мереж для автоматизованого виявлення типових дефектів (розшарування, зсуви шарів, пропуски матеріалу тощо) у процесі 3D-друку;

- отримав подальший розвиток метод попереднього опрацювання (препроцесінгу) графічних об'єктів, який базується на чисельному розв'язанні задач математичної фізики еліптичного типу (зокрема рівняння Пуассона), що дозволяє адаптувати кадри до потреб систем машинного навчання, зберігаючи їхню морфологічну цінність.

**Практична цінність отриманих результатів**

Практична цінність одержаних у дисертаційній роботі результатів полягає у створенні та впровадженні ефективної інформаційно-вимірювальної технології, призначеної для автоматизованого контролю якості виробів, виготовлених за допомогою адитивних технологій. Запропоноване рішення реалізує безперервний моніторинг процесу 3D-друку з використанням методів комп'ютерного зору та згорткових нейронних мереж, що забезпечує виявлення типових дефектів (розшарування, пропуски, зсуви шарів тощо) у режимі реального часу, з можливістю оперативної зупинки або корекції процесу друку.

Розроблене прикладне програмне забезпечення дозволяє здійснювати попередню обробку зображень друкованих об'єктів на основі вирівнювання інтенсивності пікселів із урахуванням варіацій освітлення, що підвищує достовірність і точність подальшої класифікації дефектів. Результати апробовані у виробничих умовах та під час реалізації експериментальних зразків конструктивних елементів для

радіоелектронного обладнання безпілотних літальних апаратів, де підтверджено їхню функціональність і ефективність.

Крім того, результати дослідження впроваджено в освітній процес підготовки фахівців зі спеціальності 122 – «Комп'ютерні науки» (Київський міжнародний університет), зокрема у зміст освітніх компонентів «Комп'ютерна графіка» та «Методи та системи штучного інтелекту». У ході навчального процесу студенти отримують навички розроблення програмних модулів опрацювання зображень і використання методів машинного навчання для задач виявлення дефектів.

Запропоновані технічні рішення також реалізовано у діяльності підприємств («Промел Енергоавтоматика», «Ультракон»), що свідчить про прикладну значущість розробленої технології для задач проектування, моделювання та виготовлення елементів енергетичного обладнання та удосконалення методів неруйнівного контролю.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Результати дисертації отримані в ході виконання робіт згідно тематичного плану наукових досліджень Інституту загальної енергетики НАН України, а саме:

– науково-дослідної роботи шифр «ІЗЕ-2024/1» (ДР№ 0124U000005д) за Цільовою науково-технічною програмою оборонних досліджень НАН України на 2024 рік (розпорядження Президії НАН України від 27.12.2023 року № 657);

– науково-дослідної роботи (ДР№ 0225U000422) «Розроблення інформаційно-вимірjuвальної системи моніторингу технічного стану сонячних електростанцій» за конкурсом проєктів науково-дослідних робіт молодих учених НАН України (постанова Президії НАН України від 19.06.2023 № 321).

### **Публікації результатів дисертації**

Основні наукові результати, отримані в процесі виконання дисертаційного дослідження, оприлюднено в наукових виданнях і апробовано на міжнародних науково-практичних конференціях, що відповідає вимогам до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Усього за темою дисертації опубліковано 9 праць, з них: 4 статті, у тому числі: 3 статті у наукових фахових виданнях України, включених до переліку МОН України (категорія Б); 1 публікація у виданні, що індексується міжнародною наукометричною базою Scopus; 5 тез доповідей, опублікованих у збірниках матеріалів міжнародних науково-практичних конференцій, які відбувалися в Україні, Іспанії, Німеччині та Польщі; 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на службовий твір (комп'ютерну програму «Програмний модуль вирівнювання освітленості кадрів зображень для підвищення ефективності розпізнавання дефектів 3D-друку в режимі реального часу»), що підтверджує оригінальність програмного забезпечення, розробленого у рамках дисертаційного дослідження.

1. Романенко В.В. Голубев Л.П. (2020) Дослідження програмного забезпечення для виявлення та виправлення дефектів 3D-друку. Вісник Херсонського національного технічного університету, 3 (74), 2020 р. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2020.3.8> (фахове видання, категорія Б, ISSN 2078-4481).

2. Romanenko V., Nazarenko O. (2024) Comparative Analysis of Modern Technologies of Additive Production. System Research in Energy, 2(77), 84–96. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.02.084>. (фахове видання, категорія Б, ISSN 2786-7102).

3. Romanenko V., Khaidurov V., Bekesheva A., Yarovoy R. (2024) Using the variational principle of leveling illumination in images. ITTAP 2024: 4th International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, October 23–25, 2024, Ternopil, Ukraine, Opole, Poland. CEUR-WS.org. (Scopus, ISSN 1613-0073). Pp. 355–366. Режим доступу: <https://ceur-ws.org/Vol-3896/paper20.pdf>.

4. Romanenko V., Kovtun S. (2024) Technology of Quality Control of Additive Manufacturing Products During Printing of Elements of Energy Complexes. System Research in Energy, 4(80), 84–96. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.110>. (фахове видання, категорія Б, ISSN 2786-7102).

5. Романенко В., Хайдуров В. (2024) Аналіз сучасних технологій адитивного виробництва. The 3rd International scientific and practical conference “European congress of scientific achievements”, March 25–27, 2024, Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain. 2024. 240 p. ISBN 978-84-15927-35-8. С. 82–88.

6. Романенко В. (2024) Порівняльний аналіз забезпечення контролю процесів адитивного виробництва. The 9th International scientific and practical conference “Current challenges of science and education”, May 6–8, 2024, MDPC Publishing, Berlin, Germany. 2024. 485 p. ISBN 978-3-954753-05-5. С. 254–259.

7. Romanenko V. (2024) State-of-the-art Detection of Defects in the Process of Manufacturing Objects of Serial Additive Manufacturing Based on Artificial Intelligence. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2024). Сімнадцята міжнародна науково-практична конференція, 21–22 травня 2024 р., Київ, Україна. – К.: НАУ, 2024. – 516 с.

8. Романенко В. (2024) Технологія контролю якості виробів адитивного виробництва в ході друку елементів енергетичних комплексів. II Міжнародна науково-практична конференція «Цифрові технології в енергетиці і автоматичі», 7 червня 2024 року, м. Київ. ISSN 2786-7102 (Online), ISSN 2786-7633 (Print). С. 43–45.

9. Романенко В., Заячковський В., Подніжний С. (2025) Технології і моделі змішування полімерів в екструдері принтерів. XXX Міжнародна науково-практична конференція «Перспективи розвитку сучасної науки багатопрофільного університету в контексті інтеграції в міжнародний освітній простір», 27–28 березня 2025 року, м. Київ. С. 331–336.

### **Особистий внесок здобувача**

Дисертаційна робота є самостійно виконаним науковим дослідженням. Висновки та положення, викладені в тексті роботи, отримані автором самостійно. Основні наукові результати, отримані автором дисертації, наведено у наукових працях, поданих у списку публікацій.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить: [1] – досліджено різні програмні методи і засоби реалізації макетів об’єктів складної геометричної форми, а також методи контролю якості їх друку (для визначення основних типів дефектів, які виникають в процесі друку деталей) з використанням методів, моделей і засобів комп’ютерного зору; [2] – проведений детальний аналіз технологій 3D-дуку типу Fused Deposition Modeling, Stereolithography, Selective Laser Sintering, Direct Metal Laser Sintering, Digital Light Processing. Проведено порівняльний аналіз даних технологій за різними критеріями, такими як: точність, швидкість, міцність, застосування, вартість, складність деталей, постобробка тощо; [3] – побудована і обґрунтована математична модель вирівнювання інтенсивності пікселів в кадрах, які отримуються у режимі реального часу. Математична модель лежить в

основі інформаційно-вимірювальної технології контролю якості виробів адитивного виробництва, суть якої полягає у попередньому опрацюванні кадрів зображень, які подаються на вхід до розробленої нейромережевої моделі розпізнавання основних дефектів адитивного виробництва; [4] – проведений аналіз і обрано сучасні технології для реалізації нейромережевої моделі контролю якості продукції адитивного виробництва в процесі друку елементів різних комплексів; [5] – виконано аналіз технологій сучасного адитивного виробництва, який дає можливість здійснювати вибір технології з урахуванням особливостей проєкту, який буде розроблений з використанням сучасних технологій друку. Проведений аналіз формує уявлення про особливості кожної технології та сфери застосування.

### **Апробація результатів дисертації**

Основні положення і результати дисертаційного дослідження доповідалися та обговорювалися на:

– 3rd International scientific and practical conference “European congress of scientific achievements”, March 25–27, 2024, Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain. 2024;

– 9th International scientific and practical conference “Current challenges of science and education”, May 6–8, 2024, MDPC Publishing, Berlin, Germany. 2024. 485 p. ISBN 978-3-954753-05-5.

– Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2024). Сімнадцята міжнародна науково-практична конференція, 21–22 травня 2024 р., Київ, Україна;

– II Міжнародна науково-практична конференція «Цифрові технології в енергетиці і автоматичі», 7 червня 2024 року, Київ, Україна;

– XXX Міжнародна науково-практична конференція «Перспективи розвитку сучасної науки багатопрофільного університету в контексті інтеграції в міжнародний освітній простір», 27–28 березня 2025 року, Київ, Україна.

### **Відповідність принципам академічної доброчесності**

Дисертаційна робота містить результати власних досліджень автора. Використання ідей, наукових результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

### **ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК**

У результаті обговорення положень дисертаційної роботи Романенка Владислава Володимировича на тему «Інформаційно-вимірювальна технологія контролю якості виробів адитивного виробництва» вважаємо, що

1. Дисертаційна робота Романенка В.В. є кваліфікаційною науковою працею, виконаною ним особисто, в якій розв’язано важливе науково-прикладне завдання з розроблення та впровадження інформаційно-вимірювальної технології контролю якості процесів 3D-друку. У роботі створено математичні та програмні моделі, що забезпечують розпізнавання типових дефектів друку в реальному часі на основі методів комп’ютерного зору та штучного інтелекту. Основні положення та результати дослідження, викладені в тексті дисертації, отримано автором самостійно.

2. Дисертація Романенка В.В. має наукову новизну, теоретичну й практичну значимість, відповідає вимогам пунктів 5–7 «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 (зі змінами). Фактів академічного плагіату, фабрикації або фальсифікації у тексті дисертації та в опублікованих наукових працях не виявлено.

3. Романенком В.В. за темою дисертації опубліковано 9 наукових праць, з яких 4 висвітлюють основні наукові результати (у т.ч. 1 стаття у виданні, що індексується у міжнародній наукометричній базі Scopus), і 5 наукових праць засвідчують апробацію результатів на міжнародних наукових конференціях. Усі публікації відповідають вимогам пункту 8 вищезазначеного Порядку.

4. Рекомендувати дисертаційну роботу Романенка Владислава Володимировича на тему «Інформаційно-вимірювальна технологія контролю якості виробів адитивного виробництва» до захисту з метою присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 175 – Інформаційно-вимірювальні технології.

Головуючий на засіданні розширеного семінару  
відділу моніторингу і діагностики об'єктів енергетики  
Інституту загальної енергетики НАН України  
провідний науковий співробітник,  
д-р техн. наук, професор



Юрій КУЦ

Підпис Ю.Куца засвідчую,  
учений секретар ІЗЕ НАН України,  
канд. техн. наук, ст. наук. сп.



Ірина ЛЕЩЕНКО