

До разової спеціалізованої ради ДФ 35.051.173  
Львівського національного університету  
імені Івана Франка  
м. Львів, вул. Університетська, 1

## **РЕЦЕНЗІЯ**

офіційного рецензента на дисертацію  
Мисюка Романа Володимировича  
«Методи інтелектуального аналізу зміни станів дефектів на поверхні елементів  
інженерних конструкцій»  
подану на здобуття ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»

### **Актуальність тематики дослідження**

Виявлення поверхневих дефектів та прогнозування зміни їх станів є актуальним напрямком сучасних досліджень. Активно розвиваються різні методи та підходи, які базуються на теорії тріщин та дефектів. В даний час також активно розвиваються методи інтелектуального аналізу даних, які базуються на сучасних алгоритмах штучного інтелекту, зокрема, машинного навчання. Актуальним є розвиток ефективних методів дефектоскопії у важкодоступних місцях на основі інтелектуального аналізу зображень з використанням алгоритмів машинного навчання. Інтелектуальні методи дають можливість знайти складні патерни в даних і прогнозувати цільові кількісні і категоріальні змінні при наявності достатньої вибірки історичних даних для тренування алгоритмічної моделі машинного навчання. Однак, часто вибірка експериментально отриманих даних для тренування алгоритмічної моделі є обмеженою. Тому актуально поєднувати експертні знань, аналітичні моделі та алгоритмічні моделі машинного навчання в задачах аналізу зміни станів дефектів на поверхні елементів інженерних конструкцій. Важливим напрямком інтелектуального аналізу поверхневих дефектів, який відображено у роботі, є розпізнавання на зображеннях різних сегментів, які характеризують дефекти. Розпізнавання дефектів із використанням комп'ютерного зору полягає в опрацюванні вхідного інформаційного відеопотоку та виділенні сегментів виявлених пошкоджень на зображеннях. Автономні пристрої із вбудованою камерою дозволяють ефективно здійснювати розпізнавання та аналіз дефектів на поверхнях елементів конструкцій. У дисертації запропоновано варіанти застосування підходів фізико-математичного, статистичного та прогностичного моделювання для оцінювання критичного стану поверхневих дефектів для кіберфізичної системи «МПТ – СКЗ» (МПТ – металевий підземний трубопровід, СКЗ – система катодного захисту). Важливим результатом роботи є апробація методів аналізу дефектів на малопотужних комп'ютерах, зокрема, Raspberry PI, що дає можливість реалізовувати та розміщувати аналітичні

інформаційні системи на автономних мобільних пристроях для аналізу дефектів у важкодоступних місцях.

### **Практичне значення наукових результатів**

Використані концепції комп'ютерного зору та аналізу даних з використанням технологій машинного навчання дозволяють проектувати інформаційно-аналітичні системи для досліджуваної тематики, а отримані результати дають змогу відзначити особливості та основні структурні компоненти розробки для описаного класу задач. За допомогою побудованих автором моделей можна реалізовувати процеси моніторингу з подальшою діагностикою змін станів дефектів під час функціонування інженерних об'єктів. Отримані результати дозволяють більш детально проводити наукові дослідження дефектних станів об'єктів та забезпечити достатню гнучкість архітектурних рішень щодо програмної та апаратної частин інформаційної системи.

### **Ступінь обґрунтованості результатів, їх наукова новизна**

У дисертаційній роботі Р. В. Мисюка отримано такі наукові результати:  
**вперше**

- на основі регресійних моделей і низки критеріїв розроблено метод для перевірки якості прогнозу та оцінювання ресурсу елементів інженерних конструкцій за умови врахування зовнішніх впливів та інтенсивності інформаційних потоків в контексті інтелектуального аналізу даних щодо поверхневих дефектів;
- засобами інформаційних технологій розроблено модель відбору, опрацювання й аналізу даних про фактори впливу та параметри контактуючих середовищ. В цьому контексті розв'язано оптимізаційні задачі щодо обміну даними між компонентами системи, на основі яких прийнято рішення про ефективність інформаційних потоків, які є корисні для роботи з даними у сфері дефектоскопії;
- розроблено гібридну модель діагностичної системи для аналізу зміни стану тріщин та корозійних дефектів у різних елементах конструкцій за допомогою процедури ідентифікації зображень поверхневих пошкоджень елементів інженерних конструкцій (ЕІК) на основі аналізу потоку інформації про характеристики зображень;
- розроблено новий удосконалений комплексний варіант методу оцінювання ресурсу для кіберфізичної системи “металевий підземний трубопровід (МПТ) – система катодного захисту (СКЗ)” у контексті оцінювання критичного стану дефектів на поверхнях розділу середовищ з використанням методу комп'ютерного зору;

**отримали подальший розвиток:**

- функціональна структура потоків даних у контексті інформаційної технології для опрацювання зображень дефектів (зокрема, тепловізійних), а також для проведення оцінювання ресурсу елементів конструкцій на цій основі;
- спосіб представлення даних щодо ідентифікації поверхневих дефектів ЕІК на зображеннях у контексті обміну інформації, який базується на групуванні виділених пікселів, що характеризують ефективність інформаційних потоків;
- комплексний метод уточнення параметрів для ідентифікації критичних характеристик дефектів і на основі відповідних результатів проведено аналіз ресурсу елементів конструкцій.

### **Структура і зміст дисертації**

Дисертаційна робота Р. В. Мисюка є логічно побудованим дослідженням, що послідовно описує підходи до побудови як прототипу апаратно-програмного комплексу, так і відповідних програмних модулів та розглядає особливості використання технологій машинного навчання для розпізнавання та оцінювання характеристик дефектів. Вона складається з анотації (українською та англійською мовами), вступу, де визначено актуальність, новизну, мету і завдання дослідження, чотирьох розділів із висновками до кожного з них, загальних висновків, списку використаної літератури та додатку з інформацією про наукові публікації і участь дисертанта у конференціях.

У вступі дисертації зазначено мету дослідження, що полягає у розробці нових апаратно-програмних реалізацій та доповненні існуючих підходів та методик щодо ідентифікації поверхневих дефектів та оцінювання змін їх станів на прикладі дослідження елементів інженерних конструкцій. Вказана мета дослідження чітко демонструє відношення даної роботи до сфери комп'ютерних наук та підкріплена добре сформованим списком завдань, а також інформацією про об'єкт і предмет дослідження. Зокрема, у вступній частині дисертації відзначено актуальність та важливість тематики дослідження, а саме, розглянуто основні підходи до проектування систем ідентифікації поверхневих дефектів. Автор звертає увагу на недоліки відомих методів та засобів для аналізу поверхневих дефектів та недостатність результатів вичерпного аналізу щодо контролю зображень дефектів елементів інженерних конструкцій на базі малопотужних пристроїв. Підкреслюється важливість досліджень і формування результуючих даних під час обміну даними у системі дефектів на поверхнях елементів інженерних конструкцій з їх подальшою інтеграцією у відповідне програмне забезпечення. Розв'язання такого типу завдань лежить в основі дисертації Р. В. Мисюка і окреслює вищезазначену новизну досліджень. Також у вступі автором зазначено зв'язок дисертації з науково-дослідними темами, виконуваних в межах робочого часу на кафедрі системного проектування ЛНУ імені Івана Франка.

Основні результати дисертаційної роботи Р. В. Мисюка викладено у розділах 1–4 дисертації. Основними складовими дисертаційного дослідження є: аналіз

поточного стану результатів досліджень стосовно обробки зображень з використанням відомих джерел наукової літератури, дослідження особливостей ідентифікації поверхневих дефектів та оцінювання ефективності підходу машинного навчання на мікрокомп'ютерах, а також алгоритмів обробки даних (розділ 1); розробка підходів і дослідження поведінки дефектів на поверхнях елементів інженерних конструкцій з допомогою регресійних та статистичних моделей обробки даних (розділ 2), які в свою чергу становлять частину створеного програмного забезпечення для прототипу апаратно-програмного комплексу (розділ 3) та розгляд методів діагностики ЕІК, а також оцінювання впливу інтенсивності інформаційних потоків на зміни станів корозійних дефектів на поверхнях під час аналізу досліджуваних об'єктів і встановлення умов досягнення критичних станів (розділ 4), які характеризують ефективність прототипу.

Метою першого розділу “Аналіз методів та засобів інтелектуального аналізу зображень поверхневих дефектів на поверхнях у елементах інженерних конструкцій” є дослідження сучасного стану та особливостей обробки зображень (ст. 26, 27). У підрозділі 1.1 описано методи та засоби інтелектуального аналізу даних з визначеннями і наведеними типами та основні сфери їх застосування. Концепції та актуальні завдання розглянуто у підрозділі 1.2, в якому наведено навчальні та тестові набори зображень поверхневих дефектів для різних матеріалів, оскільки їх кількість та якість впливає на результати навчання нейронних мереж та оцінювання достовірності інформації про стан пошкоджень. Крім того, описано методи використання машинного та глибокого навчання для ідентифікації поверхневих дефектів, які допомагають розв'язати задачу діагностики дефектного стану ЕІК. Також у цьому підрозділі наведено приклади використання методів машинного навчання і нейронних мереж для різних матеріалів та елементів конструкцій, що дозволяє усвідомити перспективу обраної предметної області. У підрозділі 1.4. проведено теоретичний аналіз систем діагностування елементів інженерних конструкцій. Розглянуто застосування систем діагностики, дефектоскопії, комп'ютерного зору для виявлення витоків у нафтових трубопроводах, ідентифікації дефектів на поверхнях ЕІК. Також показано загальну структуру процесу автоматизованого розпізнавання та роботи з даними, що надсилаються на реєстраційні пристрої. У підрозділі 1.5 описано архітектуру нейронної мережі, яку можна умовно поділити на частини, пов'язані з методами класичної обробки зображень та сучасними методами глибокого навчання. Коротко описано процес анотування зображень. Навчання проводилося на власних наборах даних (трубопроводи) в поєднанні з існуючими з використанням хмарних сервісів, зокрема, Google Colab. Дисертант у роботі підкреслив можливості використання сучасних інтенсивних методів, а саме CNN, YOLO, R-CNN та GAN. Крім того здійснено огляд практичного застосування відповідних методів для задачі розпізнавання дефектів на поверхнях елементів конструкцій та визначено показники якості сегментації під час ідентифікації дефектів. Підрозділ 1.6 описує особливості ідентифікації та обробки зображень, які виникають при ідентифікації

корозійних дефектів, пошкоджень типу тріщин та під час розгерметизації на поверхнях елементів інженерних конструкцій. Для оцінювання змін інформаційних потоків у підрозділі 1.7 описано результати методів обробки зображень на мікрокомп'ютері Raspberry Pi та Nvidia Jetson Nano. Крім того, описано переваги та недоліки застосування методів обробки зображень на мікрокомп'ютерах.

У другому розділі “Методи інтелектуального аналізу змін станів дефектів у елементах інженерних конструкцій” описано особливості методів аналізу зміни станів дефектів на поверхнях елементів інженерних конструкцій з урахуванням найпоширеніших типів даних під час їх дослідження. Крім того, у розділі 2 наведено джерело походження даних для дослідження та визначено параметри для їх аналізу. У підрозділі 2.1. проаналізовано методи та етапи покрокового опрацювання даних та аналізу дефектів, які були обрані для дослідження. Також наведено перелік засобів для роботи з даними та описано отримані результати. Формалізацію інформативних показників елементів інженерних конструкцій та їх опис було розглянуто у підрозділі 2.2. Наведено кругову діаграму відсоткового співвідношення причин аварій. Розглянуто важливі параметри статистичної моделі для оцінювання стану дефекту, які були використані під час досліджень елементів інженерних конструкцій. Проведено статичний аналіз інформативних параметрів, а також підтверджено важливість та доцільність обраних параметрів під час аналізу залежностей між інформативними даними. Візуалізація розподілу кількості аварій за місяцями року та роками виробництва труб дозволяє оцінити характеристики закономірностей під час аварій та сформувати модель зміни станів дефектів на поверхнях елементів інженерних конструкцій. Відповідні закономірності є достатньо корисними під час категоризації стану (критичного та некритичного) дефектів. Розглянуто використання регресійного аналізу під час оцінювання важливості ознак моделі ресурсу елементів інженерних конструкцій. Проаналізовано методи визначення параметрів елементів інженерних конструкцій, застосування нечіткої логіки та використання технологій машинного навчання. Розглянуто критичні та не критичні стани дефектів на поверхнях досліджуваних об'єктів. Описано методи оцінювання точності прогнозу щодо зміни станів поверхневих дефектів елементів інженерних конструкцій. Розглянутий у розділі підхід дозволяє відобразити найважливіші параметри моделі зміни стану дефектів елементів конструкцій, базуючись на аналізі впливу факторів діагностування та виявленні дефектів на поверхнях цих об'єктів.

Третій розділ містить опис засобів валідації використаних методів для інтелектуального аналізу зміни стану дефектів елементів інженерних конструкцій. У цьому розділі описано відповідні етапи, починаючи від вихідної інформації до розробки та доповнення автоматизованими підходами етапу прийняття рішень у процесі контролю зміни станів дефектів на поверхнях елементів інженерних конструкцій. Під час постановки задачі побудови системи розпізнавання зображень дефектів для їх перевірки було сформовано основні етапи та вимоги. Після цього у роботі описано концепцію прототипу інформаційно-діагностичної моделі з

урахуванням основних параметрів та сучасних засобів контролю. Описано можливості використання засобів та інструментів для реалізації поставленої задачі. Розглянуто методи оптимізації передачі даних на основі технологій Інтернету речей. Алгоритмічне представлення доповненого методу розпізнавання дефектів дозволяє здійснити перевірку прогнозу і з'ясувати, чи можуть відповідні результати бути застосовані у системі прийняття рішень як рекомендації чи варіанти стратегії під час контролю дефектів та підтримки обладнання у належному стані. Для цього автором оцінено характеристики апаратної архітектури та програмної частини, вибраної для розпізнавання дефектів на поверхнях ЕІК. Крім того, структурно описано сервісну частину прогнозування для дослідження кіберфізичної системи «МПТ-СКЗ» з діаграмами компонент сервісної частини. Описано процес надсилання та отримання даних за допомогою розробленого веб сервісу та відзначено результати, отримані під час валідації моделі. Наведено опис переваг та обмежень запропонованих у роботі методик з урахуванням подальшого розвитку розробленої системи на основі порівняння її з існуючими сучасними засобами розпізнавання дефектів на поверхнях ЕІК. У четвертому розділі дисертаційної роботи описано методи оцінювання результатів діагностики кіберфізичної системи «МПТ-СКЗ» та аналізу інформаційних потоків. Також сформовано задачу оцінки характеристик інформаційних потоків та визначено зміни показників ефективності системи «МПТ-СКЗ» з урахуванням інтенсивності інформаційних потоків, що дозволяє здійснювати оцінювання дефектного стану досліджуваного об'єкта (елементів інженерних конструкцій). Наведено приклади аналізу результатів моделювання корозійних процесів, які доповнюють розроблену систему даних. Розглянуто фізико-математичну модель поверхневих явищ, а також особливості функціонування та зв'язки між структурними частинами запропонованих методик. Такого типу методики спрямовані на розв'язуванні задач, пов'язаних з моделюванням характеристик якості антикорозійного захисту елементів конструкцій. Відповідні підходи та результати можуть бути корисні для оцінювання поведінки нафтогазових транспортних систем у період нестабільних та кризових ситуацій. Розглянуто методики статистичної обробки даних для оцінювання критичних станів під час функціонування інженерних об'єктів з дефектами, з урахуванням елементів теорій ймовірності та надійності під час ідентифікації дефектів ЕІК. Розглянуто задачу синхронізації потоків даних з урахуванням двох частин (прогнозування змін станів дефектів та валідації відповідно до кількості пікселів ідентифікованого дефекту), що є важливим для коректності оцінювання зміни станів дефектів на поверхнях елементів інженерних конструкцій. З метою перевірки коректності інтелектуального аналізу даних системи «МПТ-СКЗ» дисертантом враховано процедуру мінімізації затримок під час обробки даних. Також автор описав схему інформаційно-комп'ютерної технології з урахуванням корозійних процесів та аргументовано довів ефективність функціонування розробленої системи.

## **Повнота викладу матеріалів у роботах, які опубліковані автором**

У дисертації «Методи інтелектуального аналізу зміни станів дефектів на поверхні елементів інженерних конструкцій» Р. В. Мисюком чітко сформульовано завдання та повністю розкрито їх зміст відповідно до тематики дослідження. Результати дослідження відображено у тринадцяти наукових публікаціях. Також дисертантом апробовано результати на дванадцяти конференціях, п'ять з яких індексується у міжнародній наукометричній базі Scopus. Результати роботи доповідались на фаховому семінарі кафедри системного проектування факультету електроніки та комп'ютерних технологій ЛНУ імені Івана Франка.

## **Відомості про дотримання академічної доброчесності**

Ознайомившись із науковими публікаціями та дисертацією Р. В. Мисюка, відзначимо відсутність порушень академічної доброчесності.

## **Зауваження до дисертації**

Хоча дисертаційне дослідження загалом виконане на достатньо високому рівні, можна вказати декілька зауважень:

1. Доцільно було б провести більш детальний аналіз наявних підходів та реалізацій моделей для розпізнавання об'єктів, в тому числі, додатково розглянути алгоритми Faster R-CNN та Mask R-CNN, які мають свої позитивні сторони при детекції об'єктів на зображеннях. Крім того, варто розглянути можливість детальніше налаштувати параметри навчання під час використання методів машинного навчання. Описані перевірки дозволять краще зрозуміти ефективність та потенційні обмеження цих моделей, а також забезпечити їх оптимальну роботу в різних умовах.

2. Було б доцільно дослідити різні методи крос-валідації та оптимізації гіперпараметрів для регресійних моделей машинного навчання, що використовуються під час прогнозування зміни станів дефектів на поверхнях.

3. Варто було б більш детально описати та проаналізувати результати застосування різних типів анотувань зображень під час підготовки наборів даних до навчання і оцінити їх вплив на ефективність моделі.

4. Доцільно було б більше уваги приділити аугментації даних, проаналізувати вплив різних типів трансформації зображень для формування тренувальної вибірки на результати детектування різних типів дефектів на зображеннях.

Вказані зауваження та окреслені недоліки не впливають на загальну позитивну і високу оцінку одержаних науково-прикладних результатів.

## **Висновок щодо відповідності дисертації встановленим нормам.**

Дисертація Мисюка Романа Володимировича «Методи інтелектуального аналізу зміни станів дефектів на поверхні елементів інженерних конструкцій» є завершеним, цілісним та самостійним дослідженням, яке розглядає актуальні задачі розробки програмного та апаратного забезпечення для відбору, обробки та аналізу

даних на прикладі зображень та факторів впливу для контролю поверхневих дефектів, які мають відношення до елементів інженерних конструкцій.

Вважаю, що дисертаційна робота Мисюк Романа Володимировича «Методи інтелектуального аналізу зміни станів дефектів на поверхні елементів інженерних конструкцій» відповідає галузі знань 12 «Інформаційні технології», спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» та вимогам до оформлення дисертацій, затвердженим наказом МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації», і затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 44 «Порядку присудження наукового ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» від 12.01.2022 р., а її автор, Мисюк Роман Володимирович, заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

**Рецензент:**

доктор технічних наук, доцент,  
професор кафедри системного проектування  
Львівського національного університету  
імені Івана Франка МОН України

**Богдан ПАВЛИШЕНКО**