

АНОТАЦІЯ

Мисюк Р.В. Методи інтелектуального аналізу зміни станів дефектів на поверхні у елементах інженерних конструкцій — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» (галузь знань 12 «Інформаційні технології»). — Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів, 2024.

Своєчасна ідентифікація та прогнозування змін станів дефектів на поверхнях в інженерних об'єктах дозволяє запобігти руйнуванню конструкції та продовжити функціонування матеріалів. Під час аналізу пошкоджень у елементах конструкцій застосовуються різні підходи та апаратні системи, а також програмні засоби. Зазвичай відповідні комплексні системи забезпечують повний цикл опрацювання даних від моменту збору до їх візуалізації та аналізу. Для більш точного діагностування дефектів інженерних об'єктів використовуються різноманітні методики, включаючи ультразвукові, магнетоакустичні та вібраційні методи, а також обробку зображень, що базується на теплоконтролі, дефектоскопії та корозіометрії.

Постійне опрацювання великої кількості даних про поточний стан досліджуваного об'єкта (зокрема, параметрів) часто потребує збереження та вивчення попередніх історичних даних. Варто відзначити в цьому контексті, що з року в рік відбувається покращення ефективності мікропроцесорних пристроїв, зростання обсягів даних, збільшення кількості відповідних інформаційних технологій (ІТ), що дозволяє оптимізувати процес аналізу даних та здійснювати моніторинг змін параметрів системи.

Серед методів інтелектуального аналізу даних розглядаємо підхід із застосуванням алгоритмів комп'ютерного зору для більш точної сегментації поверхневих дефектів різних інженерних об'єктів. Автоматизація процесу діагностики пошкоджень досліджуваних об'єктів відбувається з допомогою

камери приєднаної до автономного пристрою. У випадку моніторингу елементів конструкцій типу підземних трубопроводів розглядаємо поверхневі дефекти (зокрема, корозійні та типу тріщин), для ідентифікації яких використовуємо відомі реалізації нейронних мереж. З метою оптимізації процесу та часу навчання моделей машинного навчання здійснювалося з використанням графічного процесора Nvidia GeForce RTX 3080 Ti у лабораторії технологій штучного інтелекту факультету електроніки та комп'ютерних технологій Львівського національного університету імені Івана Франка.

Апаратні засоби допомагають отримувати інформацію про вплив середовища на зміни поточного стану дефектів на поверхні елементів конструкцій (зокрема, трубопроводів) за допомогою зовнішніх сенсорів, з урахуванням комунікації між пристроями на основі бездротових технологій передачі даних (Wi-Fi, Bluetooth тощо). В цьому контексті доцільно використати методи та методики Технології Інтернету речей (IoT), оскільки вони дозволяють передавати множину зібраних даних із сенсорів (наприклад: інформацію про відносну вологість та кількість підрахованих пікселів у кадрі) до центрального сховища даних для подальшого їх аналізу.

Програмування діагностичних та моніторингових систем для аналізу пошкоджень (зокрема, дефектів) потребує формування низки статистичних моделей та методів для оцінювання критичних параметрів, які характеризують стан матеріалу елементів конструкцій. Методи машинного навчання дозволяють на основі гнучких моделей автоматизувати процеси класифікації та прогнозування щодо змін стану дефектів. Перевірку результатів прогнозу здійснюємо на основі вищезгаданих методик розпізнавання з допомогою мікрокомп'ютера Raspberry Pi та комплекту Nvidia JetRacer Kit.

З аналізу останніх досліджень із відкритих джерел випливає, що відомий обсяг результатів для аналізу та прогнозування зміни стану дефектів елементів конструкцій на основі статистичних моделей за допомогою інформаційних

технологій (ІТ) з урахуванням методів комп'ютерного зору недостатній для того, щоб можна було використати їх для опрацювання інформації про дефекти на поверхні інженерних конструкцій (зокрема, підземних трубопроводів). Тому варто застосовувати методики прогнозного аналізу для опрацювання зчитаних даних із сенсорів (камери, вологість, температурні зміни). Відповідний підхід дає змогу дослідити ефективність широкого спектру методів та методик розпізнавання зображень дефектів та аналізувати зміни в елементах інженерних конструкцій (ЕІК) з урахуванням поточних кліматичних умов.

Слід відзначити, що дисертаційна робота присвячена використанню методів та засобів інтелектуального аналізу змін станів поверхневих дефектів у елементах конструкцій (зокрема, у трубопроводах, інженерних об'єктах). В цьому контексті у дисертації також 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).

У першому розділі дисертаційної роботи розглянуто результати використання інформаційних технологій щодо розпізнавання дефектів у матеріалах з використанням робототехнічних засобів. Проаналізовано сучасний стан та аспекти розпізнавання дефектів на основі згорткових нейронних мереж та крайових фільтрів.

Визначено актуальні проблеми проектування ІТ з урахуванням концепцій використання методів комп'ютерного зору для аналізу зображень дефектів у темних місцях (тобто на внутрішній поверхні труб).

Вагомий внесок щодо розвитку підходів, методів, моделей та інформаційних технологій на основі обробки зображень у контексті дефектоскопії та аналізу стану дефектів на поверхні елементів конструкцій полягає у впровадженні сучасних інструментів і підходів для точнішої та ефективнішої ідентифікації дефектів та автоматизації процесу їх аналізу.

У другому розділі дисертаційної роботи проведено статистичний аналіз та здійснено прогнозування зміни стану дефектів. Для опису основного набору даних про аварійність та механічні пошкодження у процесі експлуатації трубопроводів використано звіти адміністрації з безпеки трубопроводів і поведінки небезпечних матеріалів за інформацією Міністерства транспорту США, а також аналогічні дані, отримані в Україні. Визначено основні залежності та встановлено кореляційні зв'язки стосовно параметрів впливу на аварійність елементів конструкцій, зокрема, таких як: зовнішні впливи, вік матеріалу, тривалість експлуатації та наявність ремонтів. Проведено порівняння параметричних та ймовірнісних методів для визначення змін стану дефектів і оцінювання ефективності та точності прогнозу. Використання отриманих результатів дозволяє більш комплексно діагностувати зміну стану елемента конструкції та оптимізувати систему антикорозійного захисту цього об'єкту.

Третій розділ дисертації присвячений апаратно-програмній реалізації прототипу ІТ для валідації використаних методів інтелектуального аналізу даних та оцінювання зміни станів дефектів у інженерних об'єктах.

Ідея розробки полягає в синтезі та дослідженні методів розпізнавання дефектів з використанням мікрокомп'ютера Nvidia Jetson Nano та аналізі дефектів на основі статистичного моделювання відповідних параметрів у контексті прогностичної моделі. Проведено огляд та аналіз методів бездротової передачі даних та опрацювання їх безпосередньо на мікрокомп'ютері для забезпечення автономності системи.

У четвертому розділі запропонований підхід вибору аналітичних засобів для фізико-математичного моделювання характеристик якості антикорозійного захисту конструкцій і застосування відповідних результатів для розробки ІТ. В основу відповідної інформаційної технології покладено фізико-математичну модель поверхневих явищ та методи оцінювання якісних інформативних параметрів. В результаті реалізації ІТ розроблено новий удосконалений

комплексний варіант оцінювання ресурсу для системи “металевий підземний трубопровід (МПТ) – СКЗ” у контексті комп’ютерного моделювання і враховує при цьому оптимізаційні критерії, методи та методики оцінювання змін параметрів та інформаційних потоків.

Ключові слова: інтелектуальний аналіз даних, машинне навчання, комп’ютерний зір, розпізнавання, Інтернет речей, обробка зображень, регресійні моделі, кіберфізична система, інформаційний потік, REST API, Raspberry PI, Nvidia Jetson Nano, тріщини, пітинги, дефектоскопія.

ABSTRACT

Mysiuk R.V. Methods of intellectual analysis of changes in the state of defects on the surface of elements of engineering structures — Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Ph.D in specialty 122 "Computer Science" (12 "Information technologies"). — Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, 2024.

Timely identification and forecasting of changes in the state of defects on the surfaces of engineering objects allows to prevent the destruction of the structure and to continue the functioning of the materials. Various approaches and hardware systems, as well as software tools, are used in the analysis of damage to structural elements. Usually, the corresponding complex systems provide a full cycle of data processing from the moment of collection to their visualization and analysis. Various methods are used for more accurate diagnosis of defects in engineering objects, including ultrasonic, magnetoacoustic and vibration methods, as well as image processing based on thermal control, defectoscopy and corrosiometry.

Continuous processing of a large amount of data on the current state of the object under study (in particular, parameters) often requires the preservation and study of previous historical data. It is worth noting in this context that from year to year, there is an improvement in the efficiency of microprocessor devices, an increase in data volumes, and an increase in the number of relevant information technologies (IT), which allows for optimizing the process of data analysis and monitoring changes in system parameters.

Among the methods of intelligent data analysis, we consider an approach using computer vision algorithms for more accurate segmentation of surface defects of various engineering objects. Automation of the process of diagnosing damage to the objects under investigation is carried out using a camera attached to an autonomous device. In the case of monitoring elements of constructions such as underground

pipelines, we consider surface defects (in particular, corrosion and crack type), for identification of which we use known implementations of neural networks. In order to optimize the process and training time of machine learning models, it was performed using an Nvidia GeForce RTX 3080 Ti graphics processor in the laboratory of artificial intelligence technologies of the Faculty of Electronics and Computer Technologies of the Ivan Franko National University of Lviv.

The hardware helps to obtain information about the influence of the environment on changes in the current state of defects on the surface of structural elements (in particular, pipelines) using external sensors, taking into account communication between devices based on wireless data transmission technologies (Wi-Fi, Bluetooth, etc.). In this context, it is appropriate to use the methods and techniques of the Internet of Things (IoT) technology, as they allow transferring a set of collected data from sensors (for example: information about relative humidity and the number of counted pixels in the frame) to a central data store for further analysis.

Programming of diagnostic and monitoring systems for damage analysis (in particular, defects) requires the formation of several statistical models and methods for evaluating critical parameters that characterize the material condition of structural elements. Machine learning methods allow, based on flexible models, to automate the processes of classification and forecasting regarding changes in the state of defects. We check the forecast results based on the mentioned recognition methods using a Raspberry Pi microcomputer and the Nvidia JetRacer Kit.

From the analysis of recent research from open sources, it follows that the known amount of results for the analysis and prediction of the change in the state of defects of structural elements based on statistical models with the help of information technology (IT) and taking into account computer vision methods are not sufficient to be able to use them for processing of information about defects on the surface of engineering structures (in particular, underground pipelines). That is why it is worth applying methods of predictive analysis to process data read from sensors (cameras, humidity,

temperature changes). The appropriate approach makes it possible to investigate the effectiveness of a wide range of methods and techniques for the recognition of defect images and to analyze changes in the elements of engineering structures taking into account the current climatic conditions.

It should be noted that the dissertation work is devoted to the use of methods and means of intellectual analysis of changes in the state of surface defects in structural elements (in particular, in pipelines, and engineering objects). In this context, the dissertation also offers options for applying physical-mathematical, statistical, and probability modeling approaches for assessing the critical state of surface defects for the cyber-physical system "UMP - CP" (UMP - underground metal pipeline, CP - cathodic protection).

In the first chapter of the dissertation, the results of the use of information technologies for the recognition of defects in materials with the use of robotic tools are considered. The current state and aspects of defect recognition based on convolutional neural networks and edge filters are analyzed.

The actual problems of IT design are determined, taking into account the concepts of using computer vision methods to analyze images of defects in dark places (i.e. on the inner surface of pipes). A significant contribution to the development of approaches, methods, models and information technologies based on image processing in the context of flaw detection and analysis of the state of defects on the surface of structural elements is the introduction of modern tools and approaches for more accurate and efficient identification of defects and automation of the process of their analysis.

In the second chapter of the dissertation, a statistical analysis was carried out and a forecast of the change in the state of defects was made. To describe the main set of data on accidents and mechanical damage during the operation of pipelines, the reports of the administration on the safety of pipelines and the behavior of hazardous materials according to the information of the US Department of Transportation, as well as similar data obtained in Ukraine, were used. The main dependencies were determined and

correlations were established regarding the parameters of influence on the failure of structural elements, in particular, such as: external influences, age of the material, duration of operation and availability of repairs. A comparison of parametric and probabilistic methods for determining changes in the state of defects and evaluating the effectiveness and accuracy of the forecast is carried out. The use of the obtained results makes it possible to more comprehensively diagnose the change in the state of the structural element and optimize the anti-corrosion protection system of this object.

The third section of the dissertation is devoted to the hardware and software implementation of the IT prototype for the validation of the used methods of intelligent data analysis and evaluation of the change in the state of defects in engineering objects.

The development idea consists in the synthesis and research of defect recognition methods using the Nvidia Jetson Nano microcomputer and defect analysis based on statistical modeling of relevant parameters in the context of a predictive model. A review and analysis of wireless data transmission methods and their processing directly on a microcomputer to ensure the autonomy of the system was performed.

In the fourth chapter, an approach to the selection of analytical tools for physical-mathematical modeling of the quality characteristics of anti-corrosion protection of structures and the application of relevant results for IT development is proposed. The appropriate information technology is based on a physico-mathematical model of surface phenomena and methods of evaluating qualitative informational parameters. As a result of the implementation of IT, a new and improved comprehensive resource assessment option for "UMP-CP" system was developed in the context of computer modeling and takes into account optimization criteria, methods and techniques for evaluating changes in parameters and information flows.

Keywords: intellectual data analysis, machine learning, computer vision, recognition, Internet of Things, image mining, regression models, cyber-physical system, information flow, REST API, Raspberry PI, Nvidia Jetson Nano, cracks, pittings, defectoscopy.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Публікації у фахових виданнях України категорії Б:

1. Шувар Р., Продивус А., Юзевич В., Огірко І., Огірко О., Ковтко Р., Мисюк Р. Інформаційні технології та загрози у кіберфізичних системах для відображення інформації у підземних металоконструкціях з дефектами // Штучний інтелект. – 2021. – Вип. 26 (1). – С. 85–94.
2. Mysiuk R., Yuzevych V., Mysiuk I. Data processing and visualization for corrosion detection // Electronics and Information Technologies. – 2021. – Vol. 16. – P. 50–60.
3. Mysiuk R., Yuzevych V., Mysiuk I., Ohirko I. Detecting cracks in concrete based on images using Amazon Web Service Rekognition // Electronics and Information Technologies. – 2022. – Vol. 20. – P. 18–29.
4. Mysiuk R., Yuzevych V., Mysiuk I. Api test automation of search functionality with artificial intelligence // Artificial Intelligence. – 2022. – Vol. 27, No 1. – P. 269–274.
5. Mysiuk R., Yuzevych V. IoT-based solution for detection defects in infrastructure objects using Raspberry PI // Electronics and Information Technologies. – 2023. – No. 21. – P. 45–56.

Публікації у виданнях, які проіндексовані у міжнародній наукометричній базі Scopus:

1. R.V. Mysiuk, V.M. Yuzevych, M.F. Yasinskyi, S.V. Kniaz, Z.A. Duriagina, V.V. Kulyk. Determination of conditions for loss of bearing capacity of underground ammonia pipelines based on the monitoring data and flexible search algorithms // Archives of Materials Science and Engineering – 2022. – Vol. 115, No. 1. – P. 13–20.
2. High Availability System for Monitoring Material Degradation Processes at the Concrete-polymer Interface / R. Mysiuk, V. Yuzevych, B. Koman and M. Yasinskyi //

2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT) – Spisska Kapitula, Slovakia, 26–28 September 2022. – P. 415–418.

3. Simulation of Corrosion Fracture of Nano-Concrete at the Interface with Reinforcement Taking into Account Temperature Change / R. Dzhalá, V. Yuzevych, R. Mysiuk, V. Brych, R. Skrynkovsky, V. Lozovan, Y. Tyrkalo // CEUR Workshop Proceedings. MoMLLeT+DS 2022: 4th International Workshop on Modern Machine Learning Technologies and Data Science, November, 25–26, 2022, Leiden-Lviv, The Netherlands-Ukraine – Vol. 3312 – P. 123–133.

4. Video-based Concrete Road Damage Assessment Using JetRacer Kit / R. Mysiuk, I. Mysiuk, G. Pawlowski, V. Yuzevych, M. Yasynskyi and Y. Tyrkalo // 2023 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), Jaroslaw, Poland, February 22–25, 2023. – P. 1–4.

5. Detection of Structure Changes in Lightweight Concrete with Nanoparticles Using Computer Vision Methods in the Construction Industry / R. Mysiuk, V. Yuzevych, B. Koman, Y. Tyrkalo, O. Farat, I. Mysiuk, L. Harasym // Proceedings of Eighth International Congress on Information and Communication Technology (ICICT), Lecture Notes in Networks and Systems, vol 694. Springer, Singapore. United Kingdom, London, 20–23 February 2023 – P. 339–348.

6. Detection of Surface Defects Inside Concrete Pipelines Using Trained Model on JetRacer Kit / Mysiuk R., Yuzevych V., Mysiuk I. Tyrkalo Y., Pavlenchuk A., Dalyk V. // 2023 IEEE 13th International Conference on Electronics and Information Technologies (ELIT), Lviv, Ukraine, September 26 – 28, 2023. – P. 21–24.

Публікації у наукових періодичних виданнях інших держав:

1. Mysiuk R., Mysiuk I., Pawlowski G. Data Modeling of Physical-Mechanical Processes in Nanoconcrete with the Ensemble of Pores // Path of Science. – 2022. – V. 8, No. 9 – P. 1001–1009.

2. Mysiuk R., Mysiuk I., Yuzevych V., Pawlowski G. Determining the Place of Depressurization of Underground Pipelines (Gas Pipelines): New Solutions in Industry based on Thermal Image Analysis Using Computer Vision // Path of Science. – 2022. – Vol. 8, No. 10 – P. 1001–1010.
3. Mysiuk R., Yuzevych V. Recover Data about Detected Defects of Underground Metal Elements of Constructions in Amazon Elasticsearch Service // Path of Science. – 2023. – Vol. 9, No. 1 – P. 1011–1019.
4. Mysiuk R. Pipeline Damage Assessment Based on Corrosion Segmentation Using JetRacer Kit // Path of Science. – 2023. – Vol. 9, No. 8 – P. 6001–6006.
5. Mysiuk R. Information technology for risk-based pipeline resource assessment // International scientific journal "Internauka". – 2024. – №1.
6. Obshta A., Yuzevych V., Pohrebniak A., Mysiuk R., Chorniy B. Diagnostics of oil leaks caused by malicious damage to the linear part of oil pipelines: innovative solutions for the oil industry // International scientific journal "Internauka". — 2024. — №2.
7. Mysiuk R. Towards Information Flows in Recognition and Prediction Tasks with Internet of Things // Path of Science. – 2024. – Vol. 10, No.1 – P.1001–1004.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Мисюк Р., Юзевич В. Система пошуку та відбору інформації про дефекти типу тріщин у базах знань // Міжнародна наукова інтернет-конференція “Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 53)” / Збірник тез доповідей: випуск 53 (м. Тернопіль, 16 листопада 2020 р.). – Частина 2. – Тернопіль. – 2020. – С. 57–60.
2. Mysiuk R., Yuzevych V., Koman B. Quality control of underground metal constructions with corrosion fatigue // Quality management in education and industry:

experience, problems and perspectives: proceedings of the V international scientific practical conference, May 20–21, 2021 / Lviv: «Piramida», 2021. P. 161–163

3. Мисюк Р., Юзевич В. Гнучкий алгоритм у системі пошуку та відбору інформації про дефекти типу тріщин // Міжнародна наукова інтернет-конференція “Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 55)” / Збірник тез доповідей: випуск 55 (м. Тернопіль, 9 лютого 2021 р.). – Тернопіль. – 2021. – С. 41–44.

4. Mysiuk R., Yuzevych V. Diagnosis of corrosion fatigue in underground metal constructions using genetic algorithms // III International Scientific and Practical Internet Conference “Mathematics and Informatics in Higher Education: Challenges of Modernity”, dedicated to the memory of Professors O. A. Pankov and V. S. Trokhymenko (Vinnytsia, May 20–21, 2021): book of abstracts. [Electronic network scientific publication], Vinnytsia, 2021, P. 93–96.

5. Mysiuk R. Statistical models of pipe configurations for assessment of defects in infrastructure objects // Information Technologies and Automation - 2023 / Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Conference. Odesa, October 19–20, 2023. - Odesa, ONTU Publishing House – 2023 – P. 69–71.

6. Mysiuk R., Yuzevych V. Features importance in statistical models for detecting material cracks // Quality management in education and industry: experience, problems and perspectives: proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference, November 16 – 17, 2023, - Lviv, Lviv Polytechnic Publishing House – 2023 – P. 152–153.

7. Mysiuk R., Mysiuk I., Yuzevych V., Shuvar R., Tsyuh S., Pavlenchuk N. Predictive Analysis of Macro Defects in Engineering Structures Using Machine Learning Technologies // International Conference on Optimization and Data Science in Industrial Engineering, November 16-17, 2023, Istinye University, Istanbul, Turkey – P.111.