

СЕКЦІЯ 7
НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ, ТЕХНІЧНА ТА МЕДИЧНА
ДІАГНОСТИКА, ПІДГОТОВКА ФАХІВЦІВ ГАЛУЗІ

УДК 620.179.16: 620.179.17

ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРЯМОГО НАКЛАДНОГО РОЗДІЛЬНО -
СПОЛУЧЕНОГО ЕМА ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО
КОНТРОЛЮ, ДІАГНОСТИКИ ТА ВИМІРЮВАНЬ

Сучков Г. М., Плеснецов С. Ю., Кошкарів Ю. Ю.

*Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
Харків, Україна*

E-mail: hpi.suchkov@gmail.com, rastrelly@gmail.com, koshkarov@meta.ua

Як правило при конструюванні електромагнітно-акустичних перетворювачів (ЕМАП)

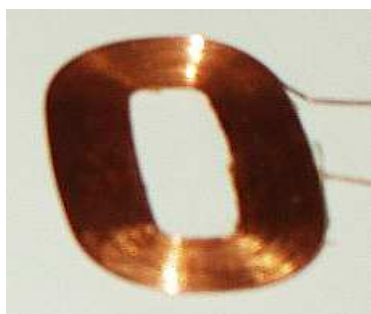


Рис. 1. Плоска високочастотна котушка індуктивності для виготовлення сполученого варіанта ЕМАП

використовують сполучену схему включення, в якій одна плоска високочастотна котушка індуктивності є збуджуючою ультразвукові імпульси і одночасно приймаючою відбиті з металовиробу ультразвукові сигнали, рис. 1. Така схема включення має два основних суттєвих недоліки: на вхід посилювача прийнятих ультразвукових імпульсів поступає велика напруга від зондуєчого сигналу, що призводить до збільшення товщини неконтрольованого

приповерхневого шару металу об'єкту контролю (ОК), і до одночасного

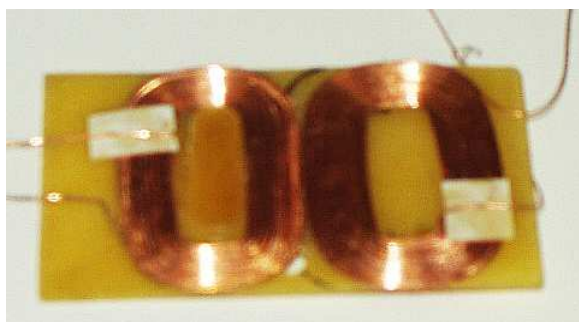


Рис. 2. Дві окремі плоскі високочастотні котушки індуктивності для реалізації роздільно – сполученого варіанта ЕМАП

погіршення узгодження плоскої високочастотної котушки індуктивності з виходом генератора зондуєчих імпульсів (ГЗІ) струму та входом посилювача прийнятих ультразвукових сигналів, відбитих з ОК, що мають різні входні і вихідні параметри.

В значній мірі виключити вказані недоліки можливо за рахунок використання двох плоских високочастотних котушок

індуктивності. Одна з них окремо підключена до виходу ГЗІ, а друга, відповідно, до входу посилювача прийнятих сигналів, рис. 2.

За рис. 2 котушки індуктивності можливо розташувати різними способами. Перший – коли робочі ділянки котушок перекриваються. В цьому випадку вдається вирішити тільки питання узгодження кожної котушки з ГЗІ та з посилювачем прийнятих ультразвукових імпульсів відбитих з ОК. Вплив імпульсів ГЗІ на вхід посилювача залишається і «мертва» зона приповерхневого шару ОК не зменшується.

Для комплексного вирішення проблеми необхідно встановити певну відстань між збуджуючою і приймаючою котушками. Така можливість є, оскільки діаграма спрямованості ультразвукового поля збуджуючої котушки має кут розкриття, який визначається конструкцією збуджуючої котушки. Відповідно приймаюча котушка також має кут розкриття діаграми спрямованості, який потрібно враховувати. Для перевірки зменшення «мертвої» зони в поверхневому шарі ОК та збільшення відношення амплітуд донних імпульсів і завад було виготовлено експериментальний стенд, спрощена блок схема якого наведена на рис. 3.

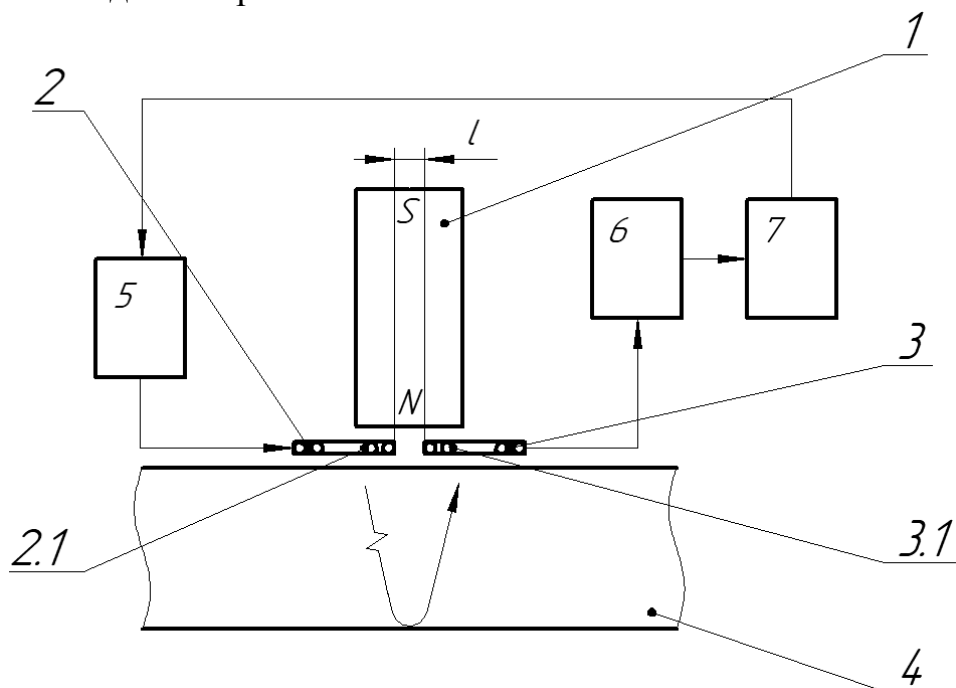


Рис. 3. Спрощена блок-схема експериментального стенду для дослідження впливу відстані між збуджуючою і приймаючою котушками індуктивності на величину «мертвої» зони і відношення амплітуд корисних сигналів і завад

Експериментальні результати впливу відстані між робочими ділянками збуджуючої і приймаючої котушок ЕМАП на амплітуду донних імпульсів наведено на рис. 4.

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що запропонована конструкція ЕМАП дозволяє зменшити «мертву» зону контролю

на 30...40 %, а відношення амплітуд донних імпульсів і завад збільшити майже в 3 рази.

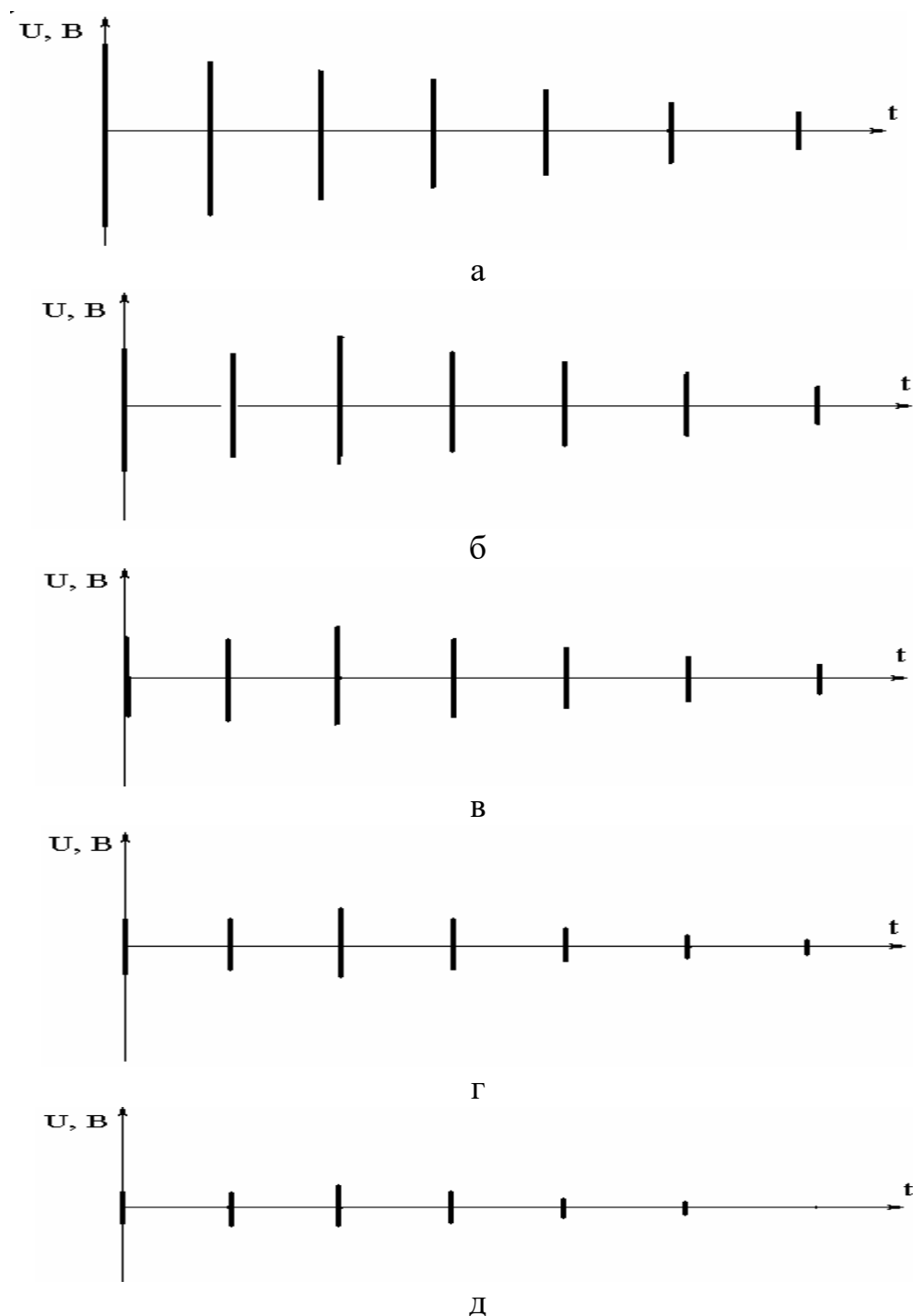


Рис. 4. Умовно позначені реалізації з послідовностями амплітуд прийнятих донних ультразвукових імпульсів для відстаней між збуджуючою і приймаючою котушками індуктивності ЕМАП 6: а –2 мм; б –3 мм; в –4 мм; г –5 мм; д – 6 мм;

Ключові слова: ультразвуковий ЕМА перетворювач, контроль, завади.

UDC 004.895.32

AREAS OF APPLICATION OF THE YOLOV8 DEEP LEARNING MODEL IN NON-DESTRUCTIVE TESTING

Momot A., Zemliakov O.

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
E-mail: drewmomot@gmail.com*

Deep neural networks are highly capable of accurately detecting objects in images. They can even detect complex objects and perform detailed image segmentation, making them ideal for detecting anomalies or defects on the surface of objects during non-destructive testing. This is especially true for automating NDT methods that use image processing to capture detailed images of objects and analyse the data to detect defects. The use of deep learning models simplifies the inspection process, reduces labour and time costs, and helps to avoid human error.

YOLO (You Only Look Once) is one of the most well-known deep learning architectures for object detection in images and videos. The basic idea behind YOLO is to use a single network that simultaneously predicts rectangular frames and identifies classes of objects within those frames. The main advantage of YOLO is its speed, as the network performs object detection for the entire image at once, while other methods can consider each image area separately [1].

YOLO uses a main unit with fully connected layers, which has a parallel structure. This allows the network to make predictions at different image scales. In addition, YOLO uses downsampling layers to help increase computational speed and improve forecast accuracy. The overall YOLO architecture is efficient and fast, making it one of the most popular architectures for reliable real-time object detection [2].

The basic YOLO architecture has a large number of modifications. YOLOv8 is the latest iteration of the YOLO series of real-time object detectors, demonstrating the highest accuracy and performance [3]. Building on the achievements of previous versions, YOLOv8 offers new features and optimisations that make it an effective tool for solving object detection problems in a wide range of applications.

With a focus on the optimal balance between accuracy and speed, YOLOv8 is suitable for real-time object detection applications in non-destructive testing. The YOLOv8 series offers a diverse set of models, each specialised in solving specific computer vision tasks. These models are designed to meet a variety of requirements, ranging from object detection to more complex tasks such as object segmentation, position or key point detection, object orientation detection and classification.

Let us consider some examples of the successful application of the YOLOv8 network in the tasks of automating image processing in non-destructive testing. In [4], it is noted that quality assurance in additive metal manufacturing is gaining increasing recognition from scientists and industry due to its obvious advantages over traditional manufacturing methods. In this paper, authors present a method for using the YOLOv8 convolutional neural network to reliably check the quality of

metallographic images. Metallographic images contain key information about metal properties, such as structural strength, ductility, toughness, and defects.

Image segmentation based on deep learning is a reliable method for detecting microstructural defects such as cracks, inclusions, and gas porosity. Therefore, the authors propose to use the YOLOv8 model with advanced convolution mechanisms to automatically segment microstructural defects in metallographic images. In particular, for the first time, the YOLOv8 algorithm was applied to a set of metallographic data from additive manufacturing of steels to detect defects such as cracks and porosity.

The authors used 414 images from the engineering company ArcelorMittal as a training dataset. The experimental results demonstrated that the YOLOv8 model successfully detected and identified cracks and porosity in the dataset, achieving a 96 % defect detection accuracy in just 0.5 hours. According to the authors, this is an improved result compared to other existing automated defect detection methods.

It is known that the surface condition is an effective indicator for assessing the quality of industrial products. Work [5] indicates that traditional methods of automated defect detection, such as eddy current, and thermal and magnetic particle inspection, are limited to certain environments and cannot achieve satisfactory accuracy. A new and promising method is deep learning-based flaw detection. The YOLO algorithm, which is based on the analysis of visual information, is considered promising.

However, due to the complex real-world industrial environment, the direct use of existing methods still has certain limitations. To solve this problem, the authors propose an improved YOLOv8 algorithm to solve the problem of surface defect detection on aluminium plates. In this work, the authors replace the basic network loss function, which allows for a better measurement of the similarity between small defects and irregularly shaped defects, thereby improving the detection accuracy. Experimental results show a clear improvement in defect detection, with the average accuracy increasing from 98.1 % to 99.3 %. Moreover, the detection performance is superior to previous modifications of YOLO and other similar models.

The use of non-destructive testing methods is also relevant in the agricultural sector, which accounts for a large share of Ukraine's economy. This issue is addressed in [6]. As stated in the paper, current research on image recognition and detection of internal cracks in corn seeds primarily relies on visible light images.

This paper presents a method based on the use of soft X-rays that successfully detect cracks inside corn seeds using the optimised YOLOv8 model. This model effectively solves the problems associated with the limited light transmission of maize seeds, the complexity of crack localisation and the problems of algorithm generalisation. The optimised YOLOv8 model demonstrates a 3.1 % increase in the average accuracy compared to the original modification. The proposed method demonstrates an average recognition accuracy of 99.66% for undamaged and damaged seeds, and the average processing time for one image frame was 7.49 ms.

The study [7] considers the problems of non-destructive detection of diseased apples. In particular, the high complexity and low real-time performance of a machine learning model for detecting diseased fruit in apple sorting was noted. The authors investigated an improved apple defect recognition model and proposed an improved method based on the YOLOv8 network. The proposed model reduces both the network complexity and the number of parameters and uses an advanced activation function to improve the model's ability to handle nonlinear dependencies. The network uses a lightweight Efficient-Neck structure, developed using lightweight modules and supplemented with a channel shuffling strategy. Experimental results show that the improved model outperforms the baseline YOLOv8 model, achieving a 2.7 % increase in average accuracy and 8.5 % improvement in output speed. This technology offers a new, efficient method for non-destructive detection of diseased fruit during apple sorting operations.

Thus, the use of deep learning models for detecting objects in images in non-destructive testing has great potential to improve the inspection process, reduce costs, and increase production quality and safety. Deep neural networks, in particular the YOLOv8 model, demonstrate high performance in detecting objects in images in real-time, making them useful for automating image processing in non-destructive testing. The use of YOLOv8 has proven to be effective in both manufacturing and agriculture. The optimised YOLOv8 model provides increased accuracy and speed of defect detection, which helps to improve product quality and optimise production processes. The use of modern machine learning methods for non-destructive testing confirms the relevance of artificial intelligence technologies in industry and agriculture.

Keywords: non-destructive testing, deep learning, object detection.

References

- [1] I. O. Skladchykov, A. S. Momot, R. M. Galagan, H. A. Bohdan, and K. M. Trotsiuk, "Application of YOLOX deep learning model for automated object detection on thermograms," *Information extraction and processing*, vol. 2022, no. 50, pp. 69-77. DOI: 10.15407/vidbir2022.50.069.
- [2] J. Terven and D. Cordova-Esparza, "A Comprehensive Review of YOLO: From YOLOv1 to YOLOv8 and Beyond," *arXiv (Cornell University)*
- [3] A. Momot, R. Galagan, and M. Zabolueva, "Automation of ultrasound breast cancer images classification using deep neural networks," *Sciences of Europe*, vol. 96, pp. 38–41, Jul. 2022. DOI: 10.5281/zenodo.6809758.
- [4] Md Hasib Zubayer, C. Zhang, and Y. Wang, "Deep Learning-Based Automatic Defect Detection of Additive Manufactured Stainless Steel," *Metals*, vol. 13, no. 12, pp. 1987. DOI: 10.3390/met13121987.
- [5] Z. Liu and K. Ye, "YOLO-IMF: An Improved YOLOv8 Algorithm for Surface Defect Detection in Industrial Manufacturing Field," *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 15-28, DOI: 10.1007/978-3-031-44754-9_2.
- [6] S. Chen, Y. Li, Y. Zhang, Y. Yang, and X. Zhang, "Soft X-ray image recognition and classification of maize seed cracks based on image enhancement and optimised YOLOv8 model," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 216, pp. 108475-108475. DOI: 10.1016/j.compag.2023.108475.

- [7] B. Han, Z. Lu, L. Dong, and J. Zhang, "Lightweight Non-Destructive Detection of Diseased Apples Based on Structural Re-Parameterisation Technique," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 5, p. 1907, Jan. 2024. DOI: 10.3390/app14051907.

UDK 535-15

MEDICAL THERMAL IMAGING DIAGNOSTICS: CURRENT PROBLEMS AND SURGICAL APPLICATION

Muraviov O. V., Dovbysh I. O.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

E-mail: stals98@ukr.net, ivanna.dovbysh@gmail.com

The application of thermal imaging cameras proves to be a highly effective method for screening patients to detect inflammatory processes in the early stages of diseases. Presently, criteria for thermal imaging diagnostics cover over two hundred diseases and conditions, with continual updates to this expanding list.

Different parts of the human body exhibit distinct normal average temperatures due to variations in blood supply and innervation. While surface temperatures of symmetrical sections in the same areas typically do not vary significantly, using the opposite symmetrical region as a control site can aid in identifying pathologies [1].

Medical thermography is increasingly prevalent in multidisciplinary medical facilities, necessitating thermographers to work under variable environmental conditions. This underscores the need for medical personnel to possess a high level of expertise and adaptability to external factors, as well as patients' incomplete thermal adaptation during the diagnostic process [2]. Enhancing the information content and aligning taken indicators with the actual surface temperature of the observed object remains a critical focus. The accuracy of diagnoses relies heavily on the correct interpretation of thermograms, achievable only with clear, high-quality images obtained under specific operational conditions and considering environmental influences on thermography camera design [3]. These tasks are tackled using computer automated systems [4]. Modern systems deliver optimal outcomes by integrating artificial intelligence technologies. The reduction in computational expenses and the effectiveness of contemporary large neural networks allow for their utilization in addressing a broad spectrum of pertinent medical diagnostic tasks.

Currently, thermography diagnostics are applied in diverse medical fields such as oncology, mammalogy, otorhinolaryngology, cardiac surgery, forensic examinations, and others. In cardiac surgeries, addressing ischemic myocardial damage is crucial due to the absence of normal coronary perfusion during aorta clamping. Employing infrared cameras for precise temperature distribution control offers innovative approaches, providing detailed temperature mapping across the entire heart surface.

During hypothermia and hyperthermia under cardiopulmonary bypass, temperature fluctuations on the myocardial surface in the study area are clearly identified. Controlled cooling and heating of brain and heart tissues aim to minimize

cardiopulmonary bypass duration and ensure optimal myocardial protection during surgical procedures.

Maintaining heart and brain temperatures between $+36\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ plays a pivotal role in safeguarding against brain hypoxic damage during open heart surgery. At the onset of warming, the temperature difference between the heat transfer agent and the human body should not surpass $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Subsequently, during the patient's warming process up to $36\text{ }^{\circ}\text{C}$, the temperature gradient should not exceed $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, while the heat transfer agent's temperature must be rigorously maintained within the range of $39.0\text{-}39.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Therefore, high-precision temperature control is paramount, both for the heat transfer agent and the patient, ensuring temperature gradients are within specified ranges for different stages of patient warming.

Thermal imaging cameras utilize two wavelength ranges in the optical spectrum: 3-5 micrometers and 8-14 micrometers, aligning with atmospheric transparency windows [5]. However, in medical thermography, the choice of spectral range is not solely based on atmospheric transparency requirements, as the measurement object (human) is in close proximity to the camera, and the air's absorption of infrared radiation is significantly lower. It has been observed that thermography cameras operating in the $3\text{-}5\text{ }\mu\text{m}$ spectral range are more sensitive to reflections of skin reradiation from external thermal radiation sources [6]. Given that the peak spectral intensity of human body radiation at a temperature of $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ is around $9.3\text{ }\mu\text{m}$ and the impact of unwanted backgrounds is less significant in the $8\text{-}14\text{ }\mu\text{m}$ range, it is advisable to focus on the design of photodetector nodes for medical thermal imagers within this spectral range.

Thermal imaging cameras operate within specific ranges of the optical spectrum, relevant to spectral intensity of human body radiation, today require optimizing spectral sensitivity and minimizing external influences [7]. The use of artificial intelligence technologies in the analysis of thermograms will significantly increase the efficiency and popularity of this non-invasive diagnostic method, also eliminate the human factors.

Keywords: medical thermal imaging diagnostics, thermography, surgery, thermogram analysis, infrared imaging camera.

References

- [1] О. В. Муравйов, В. Ф. Петрик, Ю. Ю. Лисенко, Г. А. Богдан, А. В. Наконечна, "Автоматизація методу термографічної діагностики патологій організму людини", *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, №1, с. 47-53, 2022.
- [2] О. К. Кучеренко, О. В. Муравйов, Д. О. Остапенко, "Вплив температури на абераційні властивості ІЧ об'єтивів", *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*, № 1, с. 99-105, 2013.
- [3] А. В. Муравьёв, "Основные тенденции, проблемы и перспективы развития дисплейной наноэлектроники", на *2-га наук.-техн. конф. з міжнародною участю Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському союзі, матеріали*, Польща, Люблін, 2018, с. 10-11.
- [4] К. М. Ставоровский, "Автоматична діагностика та аналіз термограмм в медичній практиці", *ElectronComm*, vol. 19, № 1 (78), с. 47-55, 2014.

- [5] О. К. Кучеренко, А. В. Муравьёв, “Методы пассивной атермализации и ахроматизации двухкомпонентных оптических систем”, *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування*, вип. № 43, с. 46–53, 2012.
- [6] Zhong-Shan Deng, Jing Liu, “Enhancement of thermal diagnostics on tumors underneath the skin by induced evaporation”, in *Proc. of the 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference*, Shanghai, 2005, pp. 7525-7528.
- [7] А. В. Муравьёв, “Пассивная атермализация оптической системы медицинского термографа”, *TRENDS OF MODERN SCIENCE*, vol. 15, pp. 88-91, 2018.

УДК 519.25:621.45

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ МЕТОДАМИ ПЕРІОДИЧНО НЕСТАЦІОНАРНИХ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ

^{1,2)}Яворський І. М., ^{1,3)}Юзефович Р. М., ⁴⁾Торба Ю. І., ¹⁾Личак О. В., ⁴⁾Сбродов Є. В.

¹⁾Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

²⁾Бидгоська політехніка, Бидгощ, Польща

³⁾Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна

⁴⁾Державне підприємство Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро “Прогрес”
імені академіка О. Г. Івченка, Запоріжжя, Україна

E-mail: ihor.yavorskyj@gmail.com, roman.yuzefovych@gmail.com, torba.yuriy@gmail.com,
olehlychak2003@yahoo.com, sbrodovev@gmail.com

Дослідження технічного стану обладнання складних механічних комплексів, у тому числі об'єктів авіаційної техніки, має виявляти наявні несправності, які ще не привели до збою чи аварії. Визначення ступенів розвитку дефектів, їх типових ознак потрібно проводити на основі детального дослідження структури вібраційних сигналів з урахуванням кінематики та динаміки діагностованих механізмів. Опис цієї структури можливий на основі відповідних математичних моделей вібраційних сигналів, які відображають ті їх ознаки, що є необхідними для встановлення технічного стану механізмів. Характерними ознаками вібраційних сигналів є повторюваність, яка зумовлена циклічним принципом дії багатьох механізмів, і стохастичність – викликана флуктуаціями товщини і в'язкості змазки, змінами сил тертя, спонтанними та некерованими змінами навантаження, турбулентністю і т. п. Оскільки поява дефектів приводить до нелінійності механічних коливних систем, тому повторюваність і стохастичність проявляються у властивостях вібрацій у взаємодії. Саме в характері такої взаємодії проявляються ті властивості коливного процесу, які в багатьох випадках є визначальними для встановлення технічного стану об'єкта, що його породжує. Адекватними моделями для опису та аналізу такої взаємодії є періодично й майже періодичні нестационарні випадкові процеси (ПНВП) [1]. Підхід, що ґрунтується на таких моделях, розроблений [1] у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України, апробований [2] та впроваджений на промислових підприємствах в Україні.

Ключові слова: періодично нестационарний випадковий процес, технічний стан, математична модель, вібраційний сигнал.

Література

- [1] І. М. Яворський, *Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань*. Львів: Фіз.-мех. ін-т НАН України, 802 с., 2013.
- [2] I. Javorskyj, R. Yuzefovych, O. Lychak, R. Slyepko, P. Semenov, “Detection of distributed and localized faults in rotating machines using periodically non-stationary covariance analysis of vibrations”, *Measurement Science and Technology*, № 34, 065102, 2023.

УДК 004.932; 658.562.4

ВІДНОВЛЕННЯ СПОТВОРЕНИХ ЗОБРАЖЕНЬ В ЗАДАЧАХ ВИМІРЮВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ

Галаган Р. М.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: r.galagan@kpi.ua

Відновлення спотворених зображень (наприклад, розмитих або змазаних) є однією з найбільш важливих проблем у завданнях обробки зображень. Хоча про цю проблему здебільшого говорять з точки зору аматорської фотозйомки, проте вона проявляється і під час контролю та вимірювання, в яких застосовується обробка відеопотоку та зображень. Наприклад, така проблема характерна під час вирішення задачі високоточного вимірювання діаметра та температури випромінюючих об'єктів [1].

Для того, щоб боротись із проблемою розмиття зображень, необхідно враховувати, що в спотвореному зображенні вся інформація відносно вихідного зображення просто перерозподіляється за деяким законом і може бути досить точно відновлена (тобто, вона не втрачена повністю й назавжди). Під час спотворення кожного пікселя вихідного зображення виходить деяка пляма у випадку розфокусування та відрізок – у випадку звичайного змазування. Все це накладається одне на одне і в результаті ми отримуємо спотворене зображення (цей процес називається згорткою зображення або конволюцією). Для того, щоб відновити вихідне зображення, необхідно певним чином звернути згортку з урахуванням шуму. Зазвичай для відновлення зображення використовується класичний математичний апарат (відомі формули, за якими відбуваються розрахунки). І це дає непоганий результат.

Проте сьогодні необхідно враховувати досягнення штучного інтелекту (ШІ) та використовувати його можливості для обробки зображень. ШІ намагається відновити деталізацію розмитого зображення, використовуючи складні математичні моделі, навчені на численних прикладах як розмитих, так і чітких зображень. Завдяки навчанню ШІ може розрізнити закономірності та взаємозв'язки на зображеннях, що дозволяє йому вносити точні коригування та

ефективно усувати розмитість зображень. Саме на цей підхід варто звернути увагу під час відновлення спотворених зображень в задачах контролю та вимірювання.

Ключові слова: змазане зображення, відновлення зображення, штучний інтелект.

Література

- [1] Р. М. Галаган, А. В. Муравьєв, А. С. Томашук, “Модель восстановления серии изображений из смазанного изображения для решения задачи высокоточного измерения диаметра и температуры излучающих объектов”, на *IV Між нар. наук.-техн. конф. Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій*, 2019, с. 169–171.

УДК 519.25:621.396

ТРИКАНАЛЬНИЙ ПОРТАТИВНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВІДБОРУ ТА ОБРОБКИ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

^{1,2)}Юзефович Р. М., ^{1,3)}Яворський І. М., ¹⁾Стецько І. Г., ¹⁾Личак О. В.,
¹⁾Стецько І. Я., ¹⁾Варивода М. З.

¹⁾Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна,

²⁾Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна,

³⁾Бидгоська політехніка, Бидгощ, Польща

E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com, igor.yavorskyj@gmail.com, stko_i@yahoo.com,
olehlychak2003@yahoo.com, irastetsko59@gmail.com, mykola.zen.varyvoda@gmail.com

Найбільш поширеними і широко використовуваними методами для визначення технічного стану елементів обертових механізмів на промислових підприємствах в Україні є застосування методів неруйнівного контролю. Такі методи не вимагають будь-яких відхилень у режимах функціонування діагностованого обладнання в процесі та після здійснення контрольних замірів, направлені на підвищення надійності та довговічності, забезпечення достатньої експлуатаційної надійності, зменшення затрат на технічне обслуговування та попередження аварійних ситуацій чи незапланованих простоїв [1].

У відділі методів і засобів відбору та обробки діагностичних сигналів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України розроблено новий 3-х канальний портативний пристрій, який відноситься до пристроїв неруйнівного контролю, основною задачею якого є відбір, обробка вібраційних сигналів у широкому діапазоні частот та визначення технічного стану працюючого обладнання з метою прийняття рішень для його технічного обслуговування в процесі довготермінової експлуатації. У пристрої використовується диференційний метод відбору вібраційного сигналу, що дозволяє послабити синфазну складову (сигнали промислових завод та ін. працюючих приладів та механізмів). Настроюванні фільтри верхніх та нижніх частот задають частотні діапазони відбору сигналів і в сукупності з антилайзинговим фільтром

забезпечують мінімальне спотворення спектральної обробки вібраційного сигналу.

До основних переваг розробленого пристрою можна віднести мобільність, точність вимірювання, наявність прикладного програмного забезпечення на основі методів періодично нестационарних випадкових процесів для експрес-аналізу вібраційного стану механізмів згідно ДСТУ 10816-1:2007.

Ключові слова: вібраційний сигнал, пристрій неруйнівного контролю, технічний стан.

Література

- [1] І. М. Яворський, *Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань*. Львів, Україна: Фіз.-мех. ін-т НАН України, 2013.

УДК 53.082:620.1:656.56

ПРИЛАД ВПП ДЛЯ МІРЯННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ

Джала Р. М., Вербенець Б. Я., Джала В. Р., Мельник М. І.

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАНУ, Львів, Україна

E-mail: dzhala.rm@gmail.com, bohdan_v@meta.ua, vjoe@ipm.lviv.ua, maryan.mi@gmail.com

Прилад мірянє постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного і омичного потенціалів ВПП призначений для діагностичних обстежень, контролю електрохімічного захисту (ЕХЗ) від корозії для запобігання пошкоджень і продовження безаварійної експлуатації магістральних підземних трубопроводів (ПТ), трубопровідних мереж та інших металевих конструкцій в електропровідному середовищі [1]. Поляризаційний потенціал (ПП) як різниця потенціалів між поверхнею металу і електродом порівняння є основним показником ЕХЗ металу в електропровідному середовищі.

За сучасною нормативно-технічною документацією прилади для мірянє потенціалів ПТ повинні мати: клас точності не більше ніж 2,5 та вхідний опір не менше ніж 10 МОм. Крім цього, для роботи в реальних умовах потрібно, щоб прилади мали мінімально можливі масу і габарити, були придатні для роботи у польових умовах. Важливими є також захищеність від завад, мале енергоспоживання, автономне живлення з часом роботи не менше робочого дня без дозарядки, достатній для роботи протягом дня об'єм пам'яті (біля тисячі вимірів), фіксація координат точок мірянє та зручний інтерфейс для опрацювання масивів вимірянє даних.

Під час реального контролю ПП потрібно вилучати омичного складника мірянє різниці потенціалів. Для цього було розроблено низку методів і пристроїв; огляд і аналіз їх недоліків наведено у розділі 3 довідникового посібника [1]. Р.М. Джала запропонував [1, 2] метод визначення ПП за вимірами постійних U_{MG} і U_{GG} та змінних V_{MG} і V_{GG} електричних напруг між металом і середовищем (MG) та між електродами у середовищі (GG) відповідно, а значення ПП металу у середовищі обчислювати за формулою:

$$U_P = U_{MG} - V_{MG} (U_{GG} / V_{GG}).$$

Тут другий член формули описує омічне падіння напруги між поверхнею металу, яку контролюють, та електродом порівняння і залежить від опорів ізоляційного покриття ПТ та середовища [1, 2].

Запропонований метод призначений для роботи у зоні дії установки катодного захисту (УКЗ) з випрямленим пульсуючим струмом, у якому є постійний і змінні складники. Обстеження передбачають міряння потенціалів (електричних напруг) у різних точках вздовж об'єкту контролю [1].

Названі напруги можна міряти послідовно відповідним вольтметром. Але це потребуватиме великих затрат часу і може призводити до значних похибок, коли ПП змінюватиметься за час кожного міряння. Тому запропоновано і реалізовано спеціальний чотириканальний пристрій, який забезпечує одночасне міряння двох постійних і двох змінних електричних напруг та обчислення за ними у мікропроцесорі поляризаційного потенціалу [1, 2]. Структурна схема пристрою для мірянь потенціалів показана на рисунку 1.

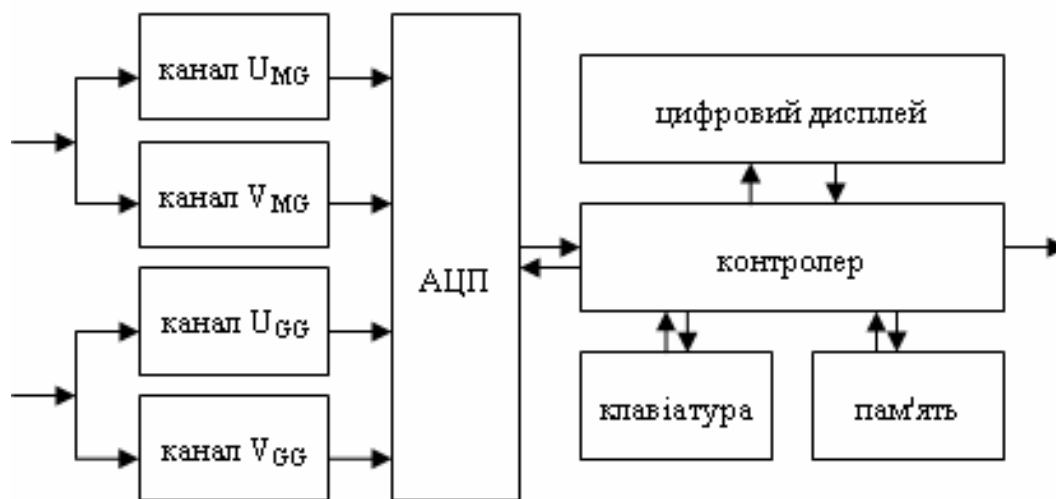


Рис. 1. Функціональна блок-схема пристрою ВПП для мірянь постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу

Схема ВПП складається з аналогової і цифрової частин, параметри яких спроектовані з урахуванням зазначених вище вимог до приладів обстежень ПТ.

Прилад ВПП скомпонований у пластиковому корпусі з автономним живленням. На передній панелі розміщені: гнізда для підключення до металу об'єкта контролю та до двох електродів, рідкокристалевий цифровий дисплей, вимикач живлення, перемикачі режимів роботи [1]. У корпусі розміщені плати підсилювачів постійних напруг двох каналів, підсилювачів змінних напруг двох каналів, управління з мікроконтролером, блок живлення та акумуляторна батарея. Для визначення координат точок міряння у прилад ВПП-М вмонтовано модуль GPS. Алгоритм роботи пристрою, математичної обробки результатів мірянь, протокол запису та зчитування з пам'яті і передачі даних в ПК

програмно закладений у мікроконтролер (мікропроцесор). Забезпечено можливість змінювати програму, вносити необхідні корективи.

На відміну від відомих приладів для міряння ПП за релаксаційним методом «увімкнуто-вимкнуто», створений ВПП не потребує обладнання усіх УКЗ, які діють у зоні контролю, спеціальними перебивачами струму та їх синхронізації. Це суттєво зменшує витрати на підготовку та підвищує оперативність обстежень ПТ.

Після підключення електродів прилад ВПП працює автоматично за спеціально розробленою програмою мікроконтролера. На цифровий індикатор виводяться чотири виміряні напруги, обчислений за формулою ПП, координати і час міряння. Забезпечено можливості запису вимірів у пам'ять і перегляду результатів на цифровому дисплеї. Реалізовано передачу даних з приладу по інтерфейсу в комп'ютер для подальшого опрацювання і документування.

На рис. 2 наведено результати міряння приладом ВПП-М розподілу поляризаційного потенціалу $U_p(l)$ уздовж магістрального трубопроводу. У точці $l = 225$ м не забезпечено захисний ПП (має бути $U_p < -0,85$ V). Отже це є найбільш імовірне місце корозії на даній ділянці ПТ. Подібні розподіли маємо і для усіх названих вище чотирьох напруг на трасі ПТ.

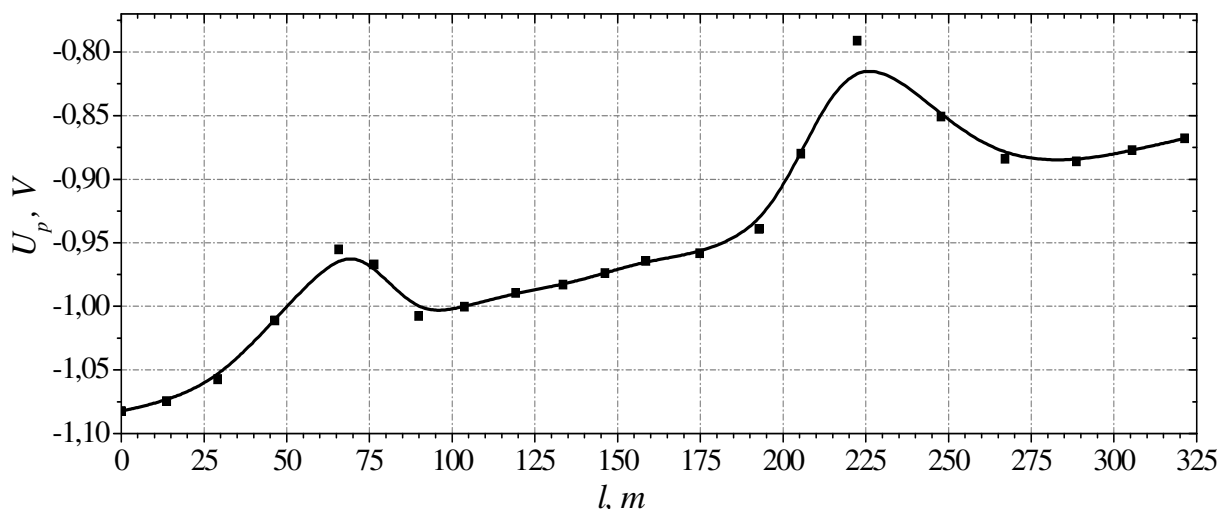


Рис. 2. Розподіл уздовж магістрального трубопроводу поляризаційного потенціалу U_p за вимірами ВПП-М.

Враховуючи, що розроблені у ФМІ НАН України прилади типу ВПП задовольняють вимогам роботи у польових умовах, реалізують новий метод визначення поляризаційного і омичного потенціалів, мають переваги над відомими аналогами, можна стверджувати що ВПП має добрі перспективи широкого застосування в Україні і за кордоном. Розроблена апаратура для визначення ПП за одночасними вимірами постійних і змінних електричних напруг методом Джали дає можливість додатково виявляти місця пошкодження захисного покриття ПТ за методами градієнта потенціалу та Пірсона. У комплексі з безконтактними міряннями струму ВПП дає змогу визначати

важливі параметри стану протикорозійного захисту ПТ і пов'язаних з ними підземних (підводних) металевих споруд [1, 2].

Ключові слова: контроль корозії, трубопроводи підземні, діагностичні обстеження, поляризаційний і омичний потенціали, прилади.

Література

- [1] Р. М. Джала, В. Р. Джала, І. Б. Івасів, В. Г. Рибачук, В. М. Учанін, *Електрофізичні методи неруйнівного контролю дефектності елементів конструкцій*. Довідниковий посібник «Технічна діагностика матеріалів і конструкцій» у 8 томах за загальної редакції З.Т. Назарчука. – Том IV під редакцією Р.М. Джали. Львів: Простір-М, 356 с., 2018 р.
- [2] R. M. Dzhalala, V. Ya. Verbenets', M. I. Melnyk, "Measuring of Electric Potentials for the Diagnostics of Corrosion Protection of the Metal Structure", *Materials Science*, vol. 52, №1, p.140–145, 2016.

УДК 620.179.14

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИНАМІЧНОЇ ПЕТЛІ МАГНІТНОГО ГІСТЕРЕЗИСУ

¹⁾Мінаков С. М., ²⁾Учанін В. М., ¹⁾Мінаков А. С., ¹⁾Вдовиченко І. М., ¹⁾Вдовиченко Д. М.

¹⁾Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

²⁾Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

E-mail: minakovsergey61@gmail.com, vuchanin@gmail.com

Для структурного аналізу конструкційних феромагнітних матеріалів все частіше вимірюють різні параметри петлі магнітного гістерезису (ПМГ), а саме коерцитивну силу (КС), яка є однією із структурно-чутливих характеристик феромагнітних матеріалів і корелює з багатьма механічними параметрами матеріалу. Крім того, КС корелює з параметрами напружено-деформованого стану і втомними структурними змінами, що дозволяє оцінювати технічний стан та залишковий ресурс конструкцій, тобто здійснювати їх експлуатаційний моніторинг [1]. Для магнітної структуроскопії застосовують й інші структурно-чутливі параметри ПМГ, зокрема залишкову індукцію B_r , магнітну проникність μ , магнітну індукцію насичення B_s та площу ПМГ, яка характеризує втрати на гістерезис за один цикл перемагнічування.

Здебільшого відомі магнітні аналізатори визначають параметри статичної ПМГ, що вимагає намагнічування ділянки контролю до насичення, однак останнім часом почали застосовувати змінні магнітні поля [2], які дозволяють зменшити потужність намагнічування і відповідно спростити прилади. Ці обставини є суттєвими для приладів, що використовуються для досліджень на натурних об'єктах. Треба зазначити, що параметри динамічної ПМГ у змінних магнітних полях за звичай відрізняються від параметрів граничної ПМГ.

Розроблений пристрій складається з генератора синусоїдальних сигналів низької частоти, підсилювача струму намагнічування, давача струму, експериментального перетворювача, АЦП, комп'ютера. Сигнал низької частоти

(50 Гц) із генератора подавали на підсилювач, потім через давач струму на обмотку намагнічування перетворювача. Із вимірювальної обмотки магнітного перетворювача знімали сигнал (напругу) і подавали на перший канал АЦП, а на інший – сигнал від давача струму. Після аналогово-цифрового перетворення цих сигналів вони надходили у персональний комп'ютер (ПК), де їх обробляли, вимірювали та візуалізували.

Магнітний перетворювач виконано у вигляді П-подібного електромагніту із обмотками намагнічування та вимірювання. Довжина його контактної частини 30 мм, ширина 17 мм. Вимірювальна обмотка магнітного перетворювача має 800 витків з мідного емаль-проводу ПЕВ-2 на каркасі з електротехнічного картону ЭВ ГОСТ 2824-86-Г. Обмотка намагнічування перетворювача має 2000 витків. На магнітний перетворювач подавали струм 20,7 мА частотою 50 Гц, що відповідало полю намагнічування 300 А/м.

Використовували генератор типу ГЗ-112 у синусоїдальному режимі, який дає змогу сформуванню частоти намагнічування 50 Гц. Для підсилення сигналу намагнічування, який подають на відповідну обмотку магнітного перетворювача, використали стандартні блоки АІ7293. Як давач струму використали електричний шунт з опором 200 Ом та потужністю 5 Вт. Для аналого-цифрового перетворення сигналу з виходу вимірювальної обмотки застосували швидкодіючий 4-канальний АЦП типу Е20-10, який забезпечує безперервний збір даних на частотах до 10 МГц. При цьому використали тільки 2 канали: один для сигналу струму в обмотці намагнічування, другий для напруги вимірювальної обмотки, який додатково інтегрували.

Первинну обробку сигналів, візуалізацію ПМГ та розрахунок її параметрів виконували за допомогою розробленої спеціалізованої програми на мові LabVIEW. Вихідні сигнали струму намагнічування та напруги вимірювальної обмоток через шину USB надходять у комп'ютер, де їх зберігають, розділяють на канали та фільтрують для вилучення високочастотних завад частотою більше 100 Гц, інтегрують сигнал напруги вимірювальної обмотки та виводять отриману інформацію. Програма забезпечує визначення параметрів динамічної ПМГ, а саме: половину максимальної ширини ПМГ по осі напруженості магнітного поля H_{\max} , половину максимальної висоти ПМГ по осі індукції B_{\max} , динамічну коерцитивну силу H_c , динамічну залишкову індукцію B_r та площу S . Отримані дані виводять на екран та зберігають у пам'яті ПК. Для зменшення завад при визначенні параметрів ПМГ усереднювали за 50 циклами намагнічування. Останнє обмежує, певною мірою, час необхідний на дослідження та обчислення ПМГ, який тут становить 1 с.

Випробовували пристрій разом з тестуванням розробленої програми, використавши зразки із листової сталі 09Г2С завтовшки 4 мм, в яких методом 4-точкового навантаження створено одновісні напруження розтягу. Результати перевірки динамічної ПМГ для навантаженого та розвантаженого зразків свідчать про чутливість її площі до механічних напружень розтягу, оскільки

вона під час навантаження зростає з 14,8 до 16,8 мТ·А/м. Інші параметри ПМГ також зазнають змін та вимагають подальших досліджень.

Ключові слова: петля магнітного гістерезису, змінні поля намагнічування, приставний перетворювач, структуроскопія.

Література

- [1] V. Uchanin, O. Ostash, G. Nardoni, R. Solomakha, Coercive Force Measurements for Structural Health Monitoring, in *The Fundamentals of Structural Integrity and Failure* (Ed. Richard M. Wilcox), Nova Science Publishers, New York, USA, pp. 163-192, 2020.
- [2] С. М. Мінаков, В. М. Учанін, А. М. Мінаков, І. М. Вдовиченко, Д. М. Вдовиченко, “Визначення параметрів динамічної петлі магнітного гістерезису конструкційних матеріалів приставними первинними перетворювачами”, *Відбір і обр. інформації*, 51(127), с. 12-18, 2023.

УДК 519.25

МЕТАДАНИ ПРИ ВІДБОРІ ТА ДОСЛІДЖЕННІ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

¹⁾Трохим Г. Р., ¹⁾Личак О. В., ^{1,2)}Юзефович Р. М., ^{1,3)}Яворський І. М., ²⁾Янішевський В. С.

¹⁾Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

²⁾Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна

³⁾Бидгоська політехніка, Бидгощ, Польща

E-mail: george.trokhym@gmail.com, olehlychak2003@yahoo.com,

roman.yuzefovych@gmail.com, ihor.yavorskyj@gmail.com, vasyl.s.yanishevskiy@lpnu.ua

Дослідження проведені у відділі відбору та обробки діагностичних сигналів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України для побудови математичних моделей дефектів підшипників показали ефективність використання імовірнісної моделі вібраційних сигналів у вигляді періодично корельованих випадкових процесів [1]. Для надійної інтерпретації результатів обробки вібраційних сигналів потрібна додаткова інформація про спосіб, місце відбору сигналу та загальні характеристики досліджуваного підшипника. Існують бази даних вібраційних сигналів [2, 3] у яких супровідні дані подані у файлах Matlab формату “.mat”. Формат даних у файлах передбачав інформацію про місце відбору сигналу, число обертів валу приводу на хвилину, а за назвою файлу в вигляді 3-ох значного десяткового числа можна було з таблиць отримати величину навантаження, розміри та локалізацію дефекту в підшипнику, частоту відбору сигналу. Для аналізу вібрацій ці дані можна закодувати в назві файлу, а саме: 1–2 позиції – місце відбору сигналу; 4–8 – частота відбору сигналу; 10–12 – навантаження; 14 – ступінь розвитку дефекту; 16 – локалізація дефекту; 18–21 – кількість обертів валу на хвилину; а позиції 3, 9, 13, 15 та 17 повинні містити розділяючий символ “_”. При цьому файл даних містить лише послідовність відліків дискретизованого вібросигналу. Набір (базу даних) файлів повинна супроводжувати відповідна специфікація, яка модифікується відповідно до умов відбору та специфіки об’єкта.

Таке кодування, на думку авторів, дозволить автоматизувати потокову обробку та аналіз файлів, уникати помилок [3, 4] та спростити візуальний пошук потрібних файлів.

Ключові слова: діагностичні сигнали, дефекти підшипників, бази даних.

Література

- [1] I. Javorskyj, R. Yuzefovych, O. Lychak, G. Trokhym, M. Varyvoda, “Methods of periodically non-stationary random processes for vibrations monitoring of rolling bearing with damaged outer race”, *Digital Signal Processing: A Review Journal*, № 145, 104343, 2024.
- [2] Case Western Reserve University Bearing Data Center Website. Seeded Fault Test Data. Fault Specifications. (<https://csegrouops.case.edu/bearingdatacenter/pages/fault-specifications>).
- [3] E. Bechhoefer, “Condition Based Maintenance Fault Database for Testing Diagnostics and Prognostic Algorithms”, 2013. (<https://www.mfpt.org/fault-data-sets/>).
- [4] W.A. Smith, R.B. Randall, “Rolling element bearing diagnostics using the Case Western Reserve University data: A bench-mark study”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, № 64–65, 100–131, 2015.

УДК 534.231.2

ПРИСТРІЙ КОНТРОЛЮ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВИХ АПАРАТІВ МЕДИЧНОГО ТА КОСМЕТОЛОГІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

¹⁾Довженко О. П., ²⁾Марченко О. Т., ¹⁾Якуніна Н. О., ¹⁾Лук’яненко Е. В.

¹⁾Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

²⁾ТОВ «ТЕХНО-МЕД Україна», Київ, Україна

E-mail: dovzhenkoa@ukr.net, al.marchenko123@gmail.com, nyanata@gmail.com, edlyk@ukr.net

Ультразвукові терапевтичні апарати (УТА) мають широке застосування в медицині та косметології. Їх лікувальні властивості при захворюваннях шкіри людей добре відомі.

Повноцінна перевірка працездатності цих апаратів відбувається в спеціалізованих центрах стандартизації та метрології через деякі проміжки часу. А при звичайній роботі УТА в медичних та косметологічних установах об’єктивно стверджувати, що УТА працює нормально, неможливо. Непрямою ознакою роботи УТА може бути індикація контакту – неконтакту ультразвукового перетворювача (УП) з тілом пацієнта, але зазвичай виміри цього параметру виконуються не на робочих лікувальних частотах УП.

Авторами був розроблений і створений пристрій контролю працездатності УТА під час його експлуатації в медичній установі. Він також може використовуватися як додаткове обладнання для вже існуючих УТА, так і як складова частина нових розробок.

Блок-схема розробленого пристрою представлена на Рисунку 1.

Всіма процесами в пристрої керує контролер (1). Після розміщення в ємності (2) УП УТА (3), та відповідної команди з пульта керування (4), ємність за допомогою насоса (5) заповнюється дистильованою водою з бака (6).

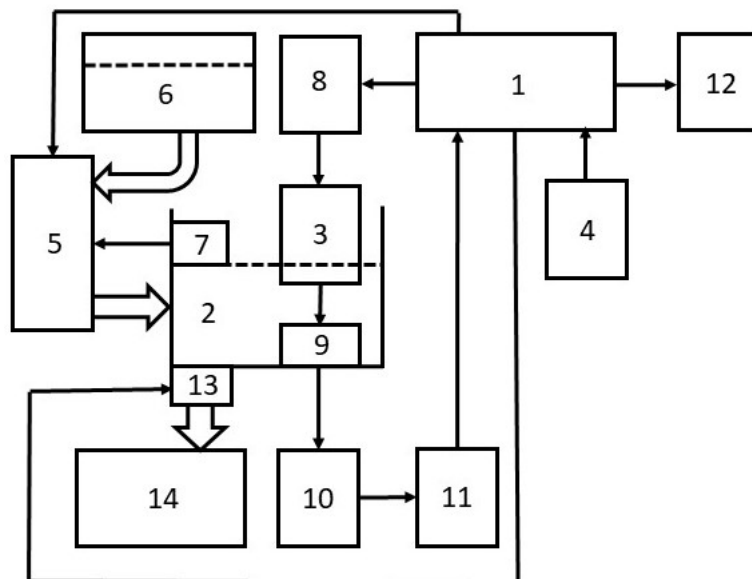


Рис. 1. Блок-схема пристрою контролю працездатності ультразвукових апаратів медичного та косметологічного призначення

Кількість води контролюється датчиком рівня (7). Після цього на УП УТА з підсилювача потужності (8) подається електричний сигнал, параметри якого відповідають лікувальному режиму. Сигнал з приймального УП (9) поступає на підсилювач (10), а з нього на аналізатор форми і рівня сигналу (11), вихід якого під'єднаний до контролера. Після проведення необхідних вимірів та обчислень контролер видає необхідну службову інформацію на індикатор (12). Після закінчення тестувань УП УТА вода з ємності через клапан (13) зливається до бака для використаної рідини (14).

Крім цього, розроблений пристрій дозволяє також оцінити роботу УП в режимі визначення контакт – неконтакт УП зі шкірою пацієнта, що також є дуже важливим. В цьому режимі на УП УТА замість лікувального подається відповідний сигнал.

Випробування дослідного зразка розробленого пристрою дали гарні результати і підтвердили його працездатність. Він хоча і не є атестованим вимірювальним приладом, але дозволяє оцінити працездатність УТА при виникненні якихось питань або сумнівів щодо їх нормальної роботи.

Ключові слова: ультразвук, п'єзоперетворювач, терапевтичні апарати, медицина, косметологія.

Література

- [1] А. Н. Беловол, С. Г. Ткаченко, Е. Г. Татузян, *Фізіотерапія в косметології: учебное пособие по элективному курсу*, Харьков, Україна: ХНМУ, 2015.
- [2] М. Ф. Терещенко, Г. С. Тимчик, М. В. Чухрась, А. Ю. Кравченко, *Ультразвукові фізіотерапевтичні апарати та пристрої: монографія*. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.

УДК 004.032.26

ЗАСТОСУВАННЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ВЕЛИКИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦІНКИ ЯКОСТІ 3D-ДРУКУ

¹⁾Слюсар В. І., ²⁾Копійка О. В.

*¹⁾Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки
Збройних Сил України, Київ, Україна*

*²⁾Інститут прикладних систем управління НАН України, Київ, Україна
E-mail: swadim@ukr.net, okopiyka@gmail.com*

Штучний інтелект (ШІ) все частіше використовується в адитивному виробництві, також відомому як 3D-друк або фаббер-технології [1 - 4], для покращення різних аспектів виробничого процесу. Зокрема серед напрямів використання ШІ в даній сфері слід вказати:

1. Оптимізація дизайну деталей, надрукованих на 3D-принтері, з урахуванням на основі ШІ таких чинників, як властивості матеріалу, виробничі обмеження та вимоги до продуктивності.

2. Управління процесом 3D друку шляхом моніторингу та оптимального формування параметрів 3D-друку в режимі реального часу з метою гарантування постійної якості деталей.

3. Вибір оптимального матеріалу для даної деталі, надрукованої на 3D-принтері, виходячи з її передбачуваного використання, бажаних властивостей та міркувань вартості.

4. Прогностичне технічне обслуговування для прогнозування за допомогою алгоритмів ШІ ймовірності відмови машини для 3D-друку, що дозволяє проводити її технічне обслуговування до того, як станеться збій.

В цілому, використання ШІ в адитивному виробництві допомагає підвищити ефективність, швидкість та якість виробничого процесу, дозволяючи виготовляти деталі з покращеними характеристиками та меншим обсягом відходів. Крім того, ШІ також використовується в пост-обробці [3, 4] поверхонь деталей, надрукованих на 3D-принтері, для покращення їх кінцевої якості. Наприклад, алгоритми ШІ можна залучити для автоматичного визначення областей об'єкту, які потребують згладжування або шліфування, та для створення траєкторій руху інструментів, що забезпечують більш гладку поверхню. У деяких випадках алгоритми ШІ також використовуються для створення дизайну нових конструкцій, які можна виготовити лише за допомогою методів 3D-друку. Це відкриває нові можливості для дизайну об'єктів друку, дозволяючи дизайнерам створювати більш складні, функціональні та естетично привабливі деталі.

Таким чином, інтеграція ШІ в процеси адитивного виробництва дозволяє оптимізувати відповідні процеси, підвищувати якість кінцевого продукту та досліджувати нові можливості дизайну. Хоча використання ШІ в адитивному виробництві знаходиться на ранній стадії, очікується, що у майбутньому він

буде відгравати все більш важливу роль, оскільки відповідні технології продовжують розвиватися та стають все більш складними. Особливо це стосується друку металевих виробів.

Поява великих мовних моделей (LLM) на основі трансформерних архітектур, особливо, GPT-4v [5], дозволяє спрогнозувати можливість їх застосування для вирішення завдання оцінки якості 3D-друку за допомогою отриманих зображень процесу виготовлення металевих виробів. Для підтвердження технологічної готовності такого підходу було проведено кілька експериментів. Сутність їх полягала в тому, щоб завантажити на розгляд GPT-4v фотознімки об'єктів з дефектами та запросити LLM здійснити аналіз відповідної сцени, надавши відповідь на питання: “Що не так на цьому зображенні?”

В результаті такого запиту для фотознімка на рис. 1 було отримано наступну відповідь GPT-4v: “На зображенні ви можете побачити частину механічного пристрою, що, схоже, є шестернею. Видно, що шестерня пошкоджена: на ній є виїдення та вм'ятини, що можуть свідчити про зношення або пошкодження внаслідок використання або перевантаження. Такі пошкодження можуть негативно вплинути на роботу механізму, до якого вона належить, спричиняючи збої у передачі крутного моменту або навіть вивести механізм з ладу.”



Рис. 1. Металева шестерня з дефектом

Інший характерний приклад стосувався зварного шву (рис. 2). Спочатку GPT-4v надав досить лаконічну відповідь стосовно рис. 2: “На зображенні видно металеву деталь зі зварним швом, який має тріщину. Тріщина у зварному шві може бути ознакою недостатньої міцності з'єднання, неправильного процесу зварювання, втоми матеріалу або впливу надмірних навантажень. Це критична несправність, яка може призвести до подальшого руйнування деталі під час експлуатації.”

На подальше прохання нажати більш розгорнуту відповідь було отримано наступне пояснення: “На наданому зображенні представлено металеву деталь із зварювальним швом, який показує ознаки дефекту у вигляді тріщини. Цей дефект є серйозним, оскільки тріщини в зварних швах можуть свідчити про ряд

потенційних проблем:

1. Неправильний зварювальний процес: Це може включати невірні параметри зварювання, використання неподходячого типу електрода або неправильну техніку зварювання.

2. Недоліки матеріалу: Якщо матеріал шва або основного металу містить включення, забруднення або інші домішки, це може зменшити міцність з'єднання.

3. Термічний вплив: Швидке охолодження зварного шва може спричинити термічні напруження та тріщини, особливо в матеріалах, чутливих до термічних циклів.

4. Втома матеріалу: Постійне механічне навантаження може призвести до втоми матеріалу, що з часом створює тріщини.

5. Корозія: Якщо матеріал піддається корозійному впливу, це може послабити зварний шов і сприяти утворенню тріщин.

6. Дефекти дизайну: Якщо конструкція деталі не розрахована на рівномірне розподілення навантажень, це може призвести до концентрації напружень у шві.

7. Порушення під час експлуатації: Перевантаження або удари можуть створити додаткові напруження, які перевищують міцність шва.

Тріщина у зварному шві є підставою для негайного дослідження та виправлення, оскільки такий дефект може призвести до відмови усєї конструкції. Визначення причини і виправлення цієї проблеми вимагають досвідченості у галузі металургії та зварювання, а також зазвичай включають неруйнівні методи контролю, такі як ультразвукова перевірка або радіографічний аналіз, для повного оцінювання обсягу проблеми.”



Рис. 2. Дефектний зварний шов

Аналіз отриманих відповідей свідчить про їх високу релевантність і здатність GPT-4v адекватно реагувати на появу дефектів на поверхні металевих об'єктів.

По аналогії з [6], на основі GPT-4v можливо також реалізувати класифікацію зображень сцен 3D-друку на наявність механічних дефектів. Для цього необхідно попередньо донавчити GPT-4v на серії відповідних зображень. Єдиним обмеженням на даний момент для реалізації такого підходу є помітний

Секція 7. НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ, **249**
ТЕХНІЧНА ТА МЕДИЧНА ДІАГНОСТИКА, ПІДГОТОВКА ФАХІВЦІВ ГАЛУЗИ

час реакції GPT-4v (кілька секунд), у тому числі при наданні запитів за допомогою API-інтерфейсу. Це дозволяє використовувати GPT-4v для обстеження об'єктів після завершення процесу їх друку або при перервах у його проведенні. Даний висновок може бути переглянутий після появи аналогічних за ефективністю локальних альтернатив GPT-4v, для спілкування з якими не потрібно мати доступ до Інтернет (наприклад, на основі LLaMa3). Разом з тим, для їх функціонування може знадобитися досить потужне серверне обладнання або доступ до хмарних обчислень, що робить такий варіант дефектоскопії порівняно дорогим на фоні традиційних нейромережних архітектур.

В цілому, застосування обчислювального штучного інтелекту на основі нейромереж та LLM має значний потенціал для поліпшення здатності виявлення дефектів 3D-друку та зниження ймовірності появи бракованих виробів. Це забезпечить безвідходність та якість виробництва і відповідність друкованих виробів вимогам технічних завдань. Включивши відповідні стратегії та методи в інтелектуальну систему ідентифікації дефектів на основі нейромережних технологій, можливо підвищити продуктивність і забезпечити високу ймовірність виявлення технологічних порушень, що сприятиме ефективній нейтралізації проблем 3D-друку. Завдяки цьому вдасться знизити ризики, а також зекономити час і ресурси, які б традиційно витрачалися на відповідний складний і відповідальний процес.

Ключові слова: адитивне виробництво, 3D-друк, велика мовна модель, LLM, GPT-4v.

Література

- [1] В. И. Слюсар, “Фаббер-технологии: сам себе конструктор и фабрикант”, *Конструктор*. №1, с. 5–7, 2002. [Online]. Available: https://slyusar.kiev.ua/SLYUSAR_kn0201.pdf. [Accessed April 24, 2024].
- [2] І. І. Слюсарь, В. І. Слюсарь, В. М. Курчанов, В. В. Шуть, “Конвертація формату 3D-моделей в інтересах адитивного виробництва електроніки”, на *9-та Міжнар. наук.-техн. конф. Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління*. Полтава – Баку – Харків – Жиліна, 2019, с. 69. [Online]. Available: https://slyusar.kiev.ua/CHPI_19_Slyusar.pdf. [Accessed April 24, 2024].
- [3] І. І. Слюсарь, В. І. Слюсар, С. В. Зуб, В. В. Шуть, “Реалізація етапу видалення супортів в об'єктах адитивного виробництва НВЧ-компонентів”, на *V Всеукр. наук.-практ. Інтернет-конф. Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика*, Полтава, 2019, с. 53–57. [Online]. Available: https://slyusar.kiev.ua/Sbornik_Slyusar_2019.pdf. [Accessed April 24, 2024].
- [4] І. І. Слюсарь, В. І. Слюсар, С. В. Зуб, “Післяпроцесна обробка результатів адитивного виробництва антенних елементів”, на *III Всеукраїнська наук.-техн. конф. Проблеми інфокомунікацій*, Полтава – Київ – Харків – Мінськ, 2019. [Online]. Available: <https://slyusar.kiev.ua/117-413-1-PB.pdf>. [Accessed April 24, 2024].
- [5] GPT-4. Technical Report by OpenAI, 27 March 2023, [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2303.08774v3.pdf>. [Accessed April 24, 2024].
- [6] І. Б. Чепков, В. І. Слюсар, А. В. Кубинський, “Методика побудови штучних нейронних мереж для ідентифікації конструкцій спеціального призначення за класифікацією та

країною походження на підставі електронно-мікроскопічного аналізу їх фрагментів”,
Озброєння та військова техніка, № 1, 2024.

UDC 535.317

COMPENSATION OF TEMPERATURE INFLUENCE TO IMAGE QUALITY OF MEDICAL THERMAL IMAGING CAMERA

Muraviov O. V., Dovbysh I. O.

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
E-mail: stals98@ukr.net, ivanna.dovbysh@gmail.com*

Nowadays, body surface thermal images are widely used to examine deviations from the norm and pathological conditions within the human organism. Medical thermography, in particular, is employed in the diagnosis of cancer, traumatic injuries, and inflammatory processes [1]. The effectiveness of thermogram analysis hinges on the contrast and quality of the captured images, which, in turn, are influenced by the ambient temperature during the diagnosis. Furthermore, the infrared lenses of thermography systems are profoundly impacted by temperature, and variations can markedly compromise the image characteristics, leading to a loss of resolution. Therefore, a key task in the design of infrared device lenses is to maintain their fundamental characteristics during temperature fluctuations within the system.

Medical thermography provides a non-contact, quick, and non-invasive diagnostic approach for various established diseases. This method enables dynamic observation and assessment of treatment effectiveness, wound healing at different morphogenesis stages, and the prevention of potential complications. Additionally, thermal imaging serves as a highly effective and informative screening method for identifying inflammatory processes during the initial stages of diseases [2]. Currently, the criteria for thermal imaging diagnostics cover over two hundred diseases and pathological conditions, with continual updates to this expanding list.

When analyzing thermogram data and making a diagnosis, specific rules and patterns come into play. For instance, a recorded temperature difference of 1-2°C between oppositely symmetrical body parts suggests the presence of an organism pathology. Specifically, in the case of tumors, a temperature change towards higher values indicates malignant degeneration, while a change towards lower values signifies the benign nature of the tumor [3].

Fluctuations in environmental temperature significantly impact the characteristics, quality, and informativeness of thermograms during the operation of infrared techniques [4]. Therefore, it is advisable to incorporate athermalization of the optical system during the design phase of such precise and sensitive devices [5]. In the synthesis of dioptric objectives, which comprise multiple components, it is feasible to select materials that facilitate system self-athermalization, while simultaneously achieving achromatization of the optical system and minimizing image aberrations that are subject to stringent requirements. For tasks such as

enhancing the characteristics and achieving thermostabilization of thermograph objectives, it is recommended to employ a passive optical athermalization method when calculating the parameters of the optical system for the infrared device [6]. This method entails the utilization of several infrared materials with varying magnitudes and signs of thermo-optical constants in combination with specific materials for the supporting structure in the design of lenses.

The infrared objectives, synthesized using passive optical athermalization, with a thermostabilized back focal length of the optical system, ensure the constancy of frequency and energy characteristics while preserving excellent image quality across the operational temperature range [7].

The implementation of medical thermography seamlessly integrates efficient pathology detection with complete non-invasiveness for both patients and medical personnel. The reliability of the diagnosis relies on the stability of thermal imaging indicators, with the primary parameter being the consistency and predictability of changes in relative temperatures. This characteristic enables the successful use of thermography cameras as a means of objective monitoring of pathological processes in the body across various medical disciplines.

The current challenge in modern medical thermography is the alteration of system image quality caused by environmental factors. Enhancements in thermal imaging technology should prioritize enhancing the image quality of thermograms and creating algorithms for automated disease diagnosis. Future research efforts should concentrate on identifying the radiation spectra of various human body parts and tissues to pinpoint the wavelengths of peak and minimal spectral intensity. This exploration will facilitate the establishment of multi-layer thermographic diagnostics, enabling the generation of precise infrared images of specific areas of the human body that are directly relevant to medical practitioners or researchers.

Keywords: thermal imaging camera, passive optical athermalization, medical thermography, image quality, infrared lens.

References

- [1] Ф. Ф. Сизов, О. В. Бехтір, В. В. Забудський та ін. “Дослідження можливостей дистанційної медичної термографії”, *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування*, вип. № 25, с. 136-140, 2003.
- [2] Ю. Олішевська, А. Стороженко, В. Думенко, “Фізичні аспекти методів теплобачення для біомедичних досліджень”, *Актуальні проблеми математики, фізики і технологій: зб. наук. пр.*, вип. № 16, с. 145-149, 2019.
- [3] О. В. Муравйов, В. Ф. Петрик, Ю. Ю. Лисенко, Г. А. Богдан, А. В. Наконечна, “Автоматизація методу термографічної діагностики патологій організму людини”, *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, №1, с. 47-53, 2022.
- [4] О. К. Кучеренко, О. В. Муравйов, Д. О. Остапенко, “Вплив температури на абераційні властивості ІЧ об’єктивів”, *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*, № 1, с. 99-105, 2013.
- [5] А. В. Муравьёв, “Основные тенденции, проблемы и перспективы развития дисплейной наноэлектроники”, на *2-га наук.-техн. конф. з міжнародною участю Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському союзі*, Польща, Люблін, 2018, с. 10-11.

- [6] О. К. Кучеренко, А. В. Муравьёв, “Методы пассивной атермализации и ахроматизации двухкомпонентных оптических систем”, *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування*, вип. № 43, с. 46-53, 2012.
- [7] А. В. Муравьёв, “Пассивная атермализация оптической системы медицинского термографа”, *TRENDS OF MODERN SCIENCE*, vol. 15, pp. 88-91, 2018.

УДК 519.25

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ МЕТОДАМИ ПКВП У ПІДШИПНИКАХ ПІДДАНИХ НАВОДНЕННЮ

^{1,2)}Юзефович Р. М., ^{1,3)}Яворський І. М., ¹⁾Комарницький Б. Р., ¹⁾Личак О. В., ¹⁾Слепко Р. Т.

¹⁾Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

²⁾Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна

³⁾Бидгоська політехніка, Бидгощ, Польща

E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com, igor.yavorskyj@gmail.com, kombodia@ukr.net,
olehlychak2003@yahoo.com, roma.srt@gmail.com

Для оцінювання міцності та довговічності елементів механічних конструкцій в реальних умовах експлуатації, потрібно проводити дослідження які будуть враховувати часові зміни фізико-механічних властивостей матеріалів за впливу зовнішнього середовища, в тому числі, водневмісного. Відомо, що під впливом водню властивості металоконструкцій можуть суттєво деградувати. Це, в свою чергу, призводить до зміни міцності і зменшення терміну придатності елементів механічних конструкцій, тобто водень має здатність значно знижувати у металів опірність руйнуванню. На практиці, як показують дослідження, часто трапляються випадки, коли машини і обладнання, що мають достатню міцність, ресурс і надійність у звичайних умовах, внаслідок наводнення втрачають працездатність, руйнуючись передчасно і непередбачено. Тому можна говорити, що водень є причиною багатьох аварій і катастроф, які спричиняють значні матеріальні та фінансові втрати. Це найчастіше спостерігається в хімічній і нафтохімічній промисловостях, в електроенергетиці та авіакосмічній техніці [1].

У відділі методів та засобів відбору та обробки діагностичних сигналів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України проводяться експерименти по вивченню вібраційних сигналів у підшипниках, які наводнюють. Такі експерименти проводяться на вібротехнічному стенді ВМС-1, який дозволяє змінювати величини, типи та характер навантаження на підшипник. Для дослідження структури таких сигналів застосовуються методи періодично корельованих випадкових процесів [2]. Використання цих методів дозволяє провести детальний кореляційний і спектральний аналіз відібраних вібраційних сигналів, та сформулювати індикатори стану підшипника на основі встановлених їх імовірнісних характеристик.

Ключові слова: періодично корельований випадковий процес, вібраційний сигнал, наводнення, підшипник.

Література

- [1] О. Андрейків, О. Гембара, *Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмістних середовищах*. Київ, Україна: Наукова думка, 2008.
- [2] І. М. Яворський, *Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань*. Львів, Україна: Фіз.-мех. ін-т НАН України, 2013.

УДК 620.179.14

ВИХРОСТРУМОВИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ЗМІН СТРУКТУРИ ПІД ЧАС ШЛІФУВАННЯ РОБОЧОЇ ПОВЕРХНІ ЗУБЧАСТИХ КОЛЕС

¹⁾Учанін В. М., ²⁾Сидоренко М. В.

¹⁾Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАНУ, Львів, Україна

²⁾Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

E-mail: vuchanin@gmail.com

Експлуатаційні характеристики зубчастих коліс (ЗК) авіаційних двигунів залежать від точності виготовлення і якості робочих поверхонь, що працюють за умов великих контактних напружень, дії сил тертя і високої температури. Тому, на кінцевому етапі їх виготовленні найвідповідальнішою операцією є шліфування зубів. Хіміко-термічна обробка (газова цементация) зубів призводить до їх деформацій і, відповідно, суттєвого зменшення точності їх виготовлення коліс. Тому профілювання ЗК виконують під час шліфуванням робочої поверхні зубів. Цей процес може призводити до структурних змін поверхневих шарів у результаті припалювань і створення залишкових напружень розтягу, які суттєво зменшують експлуатаційні властивості через зміни фізико-механічних властивостей матеріалу. Причиною припалювань є високі локальні температури в зоні різання, які можуть перевищувати температури структурних і фазових перетворень [1, 2]. Структурно-фазові перетворення визначаються режимами різання, діаграмою стану і теплофізичними характеристиками сталі. За високої швидкості охолодження мартенситне перетворення стримується, що призводить до фіксації значної частки утвореного аустеніту, і утворюється припалювання вторинного загартовування. Крім припалювання вторинного загартовування розрізняють припалювання відпуску [3, 4]. Припалювання усіх видів зменшують міцність деталей, зокрема, зменшують витривалість ЗК. За результатами випробувань ЗК з припалюваннями мають довговічність у 1,4...1,6 разів меншу, ніж у ЗК без припалювань [1]. До найперспективніших методів для аналізу змін структури поверхневих шарів сталі після шліфування слід віднести електромагнітні методи, зокрема, магнітошумовий (шумів Баркгаузена) і вихрострумний. Наше дослідження проведено з метою показати можливість використання унікального вихрострумного методу з використанням підвищених робочих

частот (вище 100 МГц), розробленого у ФМІ ім. Г. В. Карпенка, який використовували, зокрема, для виявлення тонких газонасичених шарів на поверхні титанових сплавів [3, 4]. Для кількісної оцінки параметрів шарів у новому вихрострумовому структуроскопі ВС-11ВЧ (АЛЬФА М) реалізовано спосіб контролю на основі реєстрації напруги, що призводить до зриву коливань високочастотного автогенераторного вихрострумового перетворювача (ВСП).

Досліджували зразки зі сталі ВКС–5, різну товщину структурно зміненого шару на яких отримували шляхом варіації режимів шліфування згідно запропонованого способу [5]. Для цього було виготовлено пластини розмірами 60×12×4 мм, на поверхні яких за допомогою шліфувальної машини утворювали припалювання. Для отримання різного ступеня припалювань шліфування проводять за різної глибини різання δ ($\delta = 10,0; 20,0; 30,0$ і 40 мкм), тобто товщини поверхневого шару, який знімають за один прохід. З частини заготовок було виготовлено поперечні шліфи, на яких за допомогою металографічного інвертованого мікроскопа визначали товщини припалювань загартовування.

Вихрострумовий структуроскоп ВС-11ВЧ (АЛЬФА М) працює в режимі зриву генерації на підвищеній робочій частоті 200 МГц у виносному автогенераторному ВСП з обмоткою діаметром 0,5 мм, що забезпечує максимальну чутливість до зміни електрофізичних властивостей тонкого поверхневого шару матеріалу. В приладі реалізовано спосіб кількісної оцінки параметрів шарів шляхом реєстрації зміни граничних значень керуючої напруги виносного автогенераторного ВСП. Залежність показів вихрострумового структуроскопа на робочій частоті 200 МГц під час дослідження зразків зі шліфувальними припалюваннями загартовування товщиною від 3 до 100 мкм подано на рис. 1 [6]. Для побудови залежності використано середнє значення товщини припаленого шару.

Видно, що застосування підвищеної робочої частоти 200 МГц забезпечує високу чутливість до тонких шліфувальних припалювань загартовування. Для кожного зразка існує розкид показів, що пов'язано з неоднорідністю товщини структурно зміненого стану на різних ділянках зразка. Але цей розкид незначний порівняно зі змінами показів приладу навіть для припалювання найменшої товщини (до 1...3 мкм). При цьому покази структуроскопа різко змінюються на початку діапазону змін товщини припаленого шару (до 7...10 мкм), після чого спостерігається певне насичення і покази структуроскопа в діапазоні від 7...10 мкм до 100 мкм змінюються на незначну величину. Такий характер залежності пояснюється суттєвим впливом скін-ефекту через високу робочу частоту (200 МГц). Таким чином, існує статистична кореляція між показами структуроскопа і товщиною припалених шарів, що дозволяє стверджувати про можливість кількісної оцінки глибини припалювань загартовування (особливо в діапазоні малих товщин припалених шарів).

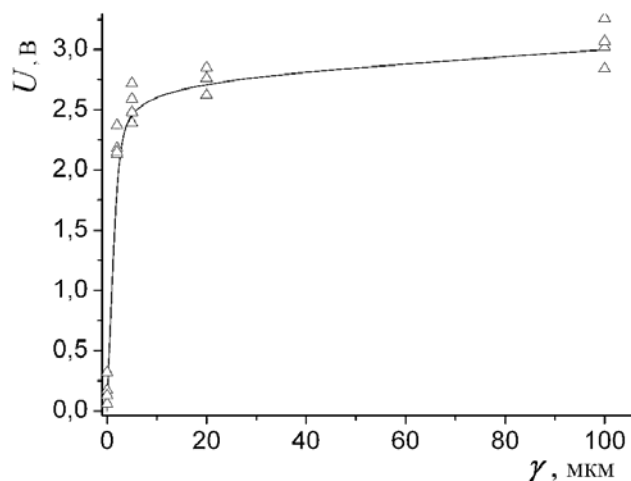


Рис. 1. Залежність показів вихрострумовевого структуроскопа ВС-11ВЧ від товщини припаленого шару γ

Висновки. Представлено спосіб виготовлення зразків з припалюваннями заданої глибини на основі варіації режимів шліфування з використанням отриманих попередньо кореляційних залежностей. Показано принципову можливість виявлення і оцінки товщини шліфувальних припалювань (зокрема, найнебезпечніших припалювань загартовування) за допомогою вихрострумовевого методу з використанням підвищених робочих частот.

Ключові слова: зубчасті колеса, шліфувальні припалювання, вихрострумівий структуроскоп, вихрострумівий автогенераторний перетворювач

Література

- [1] В. Г. Лебедев, Н. Н. Клименко, С. А. Аль-Аджелат, “Механизм образования прижогов при шлифовании деталей из закаленных сталей”, *Наукові нотатки*, вип. 40, Луцьк, с. 141–143, 2013.
- [2] В. Г. Лебедев, Е. А. Луговская, “Фазово-структурный состав поверхностных слоев деталей при шлифовании”, *Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві*, вип. 3(8), с. 204–212, 2015.
- [3] В. Н. Учанин, Н. П. Калинин, В. Н. Зыбов, Ю. С. Грабский, “Вихретоковый высокочастотный структуроскоп для выявления газонасыщенных слоев изделий из титановых сплавов”, *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, № 4, с. 68–71, 1989.
- [4] V. Uchanin, “Elevated Frequencies in Eddy Currents - New Possibilities of Thin Surface Layer Evaluation”, in *Proc. 15th World Conf. on Nondestructive Testing, Rome, 2000* (www.ndt.net).
- [5] В. М. Учанин, М. В. Сидоренко, “Спосіб виготовлення зразків для настроювання приладів контролю змін структури під час шліфування поверхні”, *Пат. України* № 100738, МПК G01N27/90, Опубл. 10.08.2015, Бюл. № 15.
- [6] В. М. Учанин, М. В. Сидоренко, “Дослідження вихрострумівих методів виявлення та оцінки змін структури під час шліфування виробів із теплостійкої сталі ВКС-5”, *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, № 4, с. 21-26, 2016.

УДК 519.117.3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ВІБРАЦІЇ В ТРАНСПОРТНІЙ КОЛІСНІЙ МАШИНІ

¹⁾Черчик Г. Т., ¹⁾Личак О. В., ¹⁾Трохим Г. Р., ^{1,2)}Юзефович Р. М., ^{1,3)}Яворський І. М.

¹⁾Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

²⁾Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна

³⁾Бидгоська політехніка, Бидгощ, Польща

E-mail: hcherchyk@gmail.com, olehlychak2003@yahoo.com, george.trokhym@gmail.com,
roman.yuzefovych@gmail.com, igor.yavorskyj@gmail.com

На даний час амортизація чутливих до вібрації елементів при збереженні оптимальних техніко-економічних показників: функціональність, комфортність, економічність, енерго- та матеріаломісткість, експлуатаційні витрати, витрати на ремонт та ін. є важливою проблемою проектування сучасних транспортних засобів, зокрема колісних машин. Цю проблему вирішують з допомогою сучасних комп'ютерних програм шляхом оптимізації та удосконалення методів розрахунку дії динамічних навантажень на машину, що дозволяє наблизити результати теоретичних розрахунків до даних отриманих експериментальним шляхом [1].

Для використання адекватного застосування програмних систем моделювання необхідно достовірно знати реальні динамічні навантаження, що діють на машину в реальних умовах експлуатації, а також мати дані стосовно локальних навантажень в критичних елементах конструкції, зокрема у болтових з'єднаннях. Такі дані отримують експериментально в процесі випробувань відповідних транспортних засобів.

Для такого моделювання слід враховувати гнучкість конструкції машини та локальний розподіли динамічних навантажень, а також враховувати деформативність конструкцій в цілому. Для цього слід застосувати дискретно-континуальну модель динаміки машин. Дискретно-континуальне моделювання має широке застосування в розрахунку динаміки колісних машин та поїздів [2, 3] для визначення напружень в такого роду конструкціях при динамічних навантаженнях.

Ключові слова: вібрація, математична модель, колісні машини.

Література

- [1] Б. М. Дівеєв, М. М. Николишин, В. Г. Опалко, Г. Т. Черчик, Вібронавантаженість з'єднань елементів конструкцій колісних машин, *Міжвузівський збірник “Наукові нотатки”*, № 55, 127–133, 2016.
- [2] D.E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Boston, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., 1989.
- [3] Б. Дівеєв, О. Миронюк, Р. Шевчук, “Дискретно-континуальна модель для розрахунку динамічних характеристик струшувача плодів”, *Машинознавство*, № 8, 15–19, 1998.

УДК 534.231.2

ПРИСТРІЙ КОНТРОЛЮ КОНТАКТУ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ГОЛОВКИ НА ОСНОВІ PVDF П’ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОЇ ПЛІВКИ З ТІЛОМ ПАЦІЄНТА

¹⁾Довженко О. П., ²⁾Марченко О. Т., ¹⁾Якуніна Н. О., ¹⁾Лук’яненко Е. В.

¹⁾Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

²⁾ТОВ «ТЕХНО-МЕД Україна», Київ, Україна

E-mail: dovzhenkoa@ukr.net, al.marchenko123@gmail.com,
nyanata@gmail.com, edlyk@ukr.net

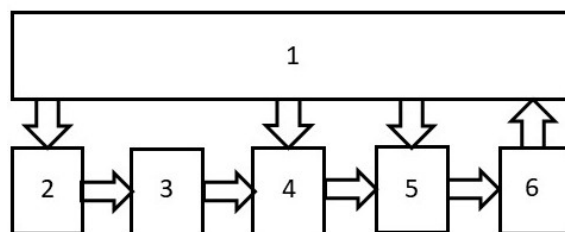
Застосування PVDF п’єзоелектричної плівки в п’єзоперетворювачах (ПП) ультразвукових косметологічних та медичних апаратів дозволяє використовувати лікувальні сигнали в широкому діапазоні частот – від одиниць до десятків мегагерц. У цих плівок відсутні явно виражені резонансні властивості, що з однієї сторони добре для передачі широкосмугового сигналу, але не дозволяє застосувати традиційний метод визначення контакт – неконтакт ПП з тілом пацієнта на основі залежності добротності ПП від механічного навантаження на одній з резонансних частот.

Один з методів вирішення поставленої задачі є аналіз ультразвукового сигналу, відбитого від внутрішніх шарів шкіри пацієнта. На перший погляд зробити це просто, розділивши робочу площу ПП на дві частини - випромінюючу і приймальну. Однак, реалізація такого рішення важка, враховуючи що товщина наявної плівки всього лише 52 мкм, а її площини вкриті шарами хрому (40 нм) і золота (250 нм), максимально допустима зовнішня температура 90 градусів за Цельсієм. Тому обробка поверхні п’єзоплівки для отримання окремих сегментів потребує спеціального обладнання.

Для вирішення поставленої задачі авторами було запропоновано використання всієї площі ПП як випромінювача, так і приймача акустичного сигналу. Окрім цього, для збудження ПП був розроблений високочастотний підсилювач потужності класу D, вихідний опір якого при відсутності сигналу великий і не шунтує ПП під час прийому відбитого ультразвукового сигналу.

Спрощена блок-схема розробленого і виготовленого пристрою представлена на Рисунку 1.

Всіма процесами в пристрої керує контролер (1), за командою якого підсилювач потужності (2) подає запрограмований електричний сигнал на ПП (3). Після закінчення випромінювання контролер дозволяє роботу підсилювачу сигналу (4), вихідний сигнал якого поступає на вхід аналізатора форми (5). Якщо форма цього сигналу співпадає з випроміненою раніше, то величину прийнятого і підсиленого сигналу визначає детектор (6). Контролер за допомогою внутрішнього АЦП вимірює вихідний сигнал детектора і визначає, чи достатня його величина для нормальної роботи ультразвукового апарата.



Рисунку 1. Спрощена блок-схема пристрою контролю контакту ультразвукової головки на основі PVDF п'єзоелектричної плівки з тілом пацієнта

В результаті проведених експериментів було встановлено, що розроблений і виготовлений пристрій дозволяє вирішити поставлену задачу і може бути застосований як складова частина в нових розробках.

Ключові слова: ультразвук, п'єзоперетворювач.

Література

- [1] А. Н. Беловол, С. Г. Ткаченко, Е. Г. Татузян, *Физиотерапия в косметологии: учебное пособие по элективному курсу*. Харьков, Україна: ХНМУ, 2015.
- [2] М. Ф. Терещенко, Г. С. Тимчик, М. В. Чухраєв, А. Ю. Кравченко, *Ультразвукові фізіотерапевтичні апарати та пристрої: монографія*. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.

УДК 004.89

ВИМОГИ ДО ФОРМУВАННЯ НАБОРУ ДАНИХ ДЛЯ НАВЧАННЯ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ З МЕТОЮ ПОШУКУ ПОЖЕЖ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА

Галаган Р. М.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: r.galagan@kpi.ua

Сьогодні безпілотні літальні апарати (БПЛА) застосовуються для вирішення багатьох задач [1], однією з яких є виявлення осередків пожеж у природному середовищі. Виявлення пожеж відбувається на основі аналізу відеопотоку із камери БПЛА. Для того, щоб БПЛА міг це робити в автоматичному режимі та самостійно визначати наявність або відсутність пожежі на зображенні, необхідно інтегрувати в його програмне забезпечення нейромережеві модулі. Проте попередньо має бути вирішене ключове завдання: для навчання нейронної мережі (НМ) необхідно сформувати набір даних (зображень) [2].

Наявність якісного набору даних (англ. dataset) є запорукою ефективного навчання НМ та її високої точності під час обробки відеопотоку з камер БПЛА з метою автоматичного пошуку осередків пожеж. Без достатньої кількості навчальних даних моделі глибокого машинного навчання не можуть вивчити основні характеристичні ознаки, що необхідні для створення надійних класифікацій. Необхідна кількість навчальних даних залежить від задач, які

поставлені перед НМ, від складності архітектури самої НМ тощо. Зазвичай, коли мова йде про навчання НМ розпізнавати щось на основі аналізу зображень, то кількість зображень в навчальній та валідаційній вибірках коливається від кількох тисяч до десятків тисяч.

Зібрати якісний набір даних, що призначений для навчання НМ з метою автоматичного виявлення пожеж в природніх умовах, є непростим завданням. Аналіз інформаційних ресурсів показав, що на сьогодні є до десяти більш-менш якісних наборів даних, що призначені для навчання та тестування НМ з метою виявлення пожеж [3-4]. Проте деякі із них занадто малі (мають кілька сотень зображень), інші – незбалансовані, а деякі містять зображення, що не зовсім відповідають поставленому завданню виявлення пожеж на відкритій місцевості.

Тому постає важливе завдання, яке полягає у створенні такого набору даних, що є об’ємним (містить багато зображень з різними локаціями), але водночас не містить недоречних зображень (тобто таких, що не відповідають умовам, в яких використовується БПЛА для виявлення пожеж). Наприклад, до таких недоречних зображень можна віднести фотографії простого туристичного багаття, фотографії пожеж будинків або пожеж всередині будинків. Звичайно, подібні зображення містять вогонь, проте це не той вид вогню, який потрібно буде розпізнавати на основі аналізу відеопотоку з БПЛА. Також до недоречних зображень можна віднести зображення без вогню таких локацій, які навряд чи траплятимуться під час моніторингу місцевості за допомогою БПЛА. Наприклад, зображення пляжу, моря, інтер’єру приміщень, просто неба тощо. Подібні зображення під час навчання призводитимуть до того, що мережа сформує невірні характеристичні ознаки, за якими в майбутньому їй потрібно буде класифікувати реальні зображення та визначати наявність або відсутність осередків пожеж.

Під час добору зображень, що входять до набору даних для навчання та тестування НМ, потрібно враховувати такі вимоги:

1. На зображеннях повинні бути зафіксовані такі локації: поля, ліси, лісостеп, частково гори та частково забудова (яка відповідає переходу сільськогосподарських угідь у міську забудову).

2. Зображення повинні бути зроблені вдень, зранку та увечері. Також обов’язково має бути певна кількість зображень із заходами сонця та туманом, оскільки ці природні явища схожі на вогонь та дим від вогню, а НМ має навчитись їх розпізнавати як такі, що не містять вогню.

3. Зображення з вогнем повинні містити вогонь, що є реальною пожежею, а не просто невеликим туристичним багаттям, що сфотографоване збоку. Однак при цьому мають бути фото вогню на полі або в гористій місцевості, що зроблені з великої відстані. У такому випадку осередки пожеж нагадуватимуть ніби невелике багаття, проте така ситуація є також необхідною для навчання НМ.

4. Зображення мають бути різних масштабів та фіксувати природне середовище та вогонь з різних відстаней.

5. Точка огляду, з якої зроблено зображення, здебільшого має бути над пожежею або над локацією без пожежі. Проте допустима деяка кількість зображень пожеж збоку.

Розглянуті вимоги є базовими. Якщо їх дотримуватись, то можна зібрати якісний набір даних для навчання НМ з метою автоматичного виявлення пожеж на основі аналізу відеопотку з камер БПЛА.

Ключові слова: нейронна мережа, набір зображень, dataset, БПЛА, осередки пожеж.

Література

- [1] О. В. Муравйов, І. О. Довбиш, Р. М. Галаган, Г. А. Богдан, А. С. Момот, “Перспективи розвитку технології та підвищення рівня автономності БПЛА”, *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Том 34 (73), № 2. с. 199-205. DOI 10.32782/2663-5941/2023.2.1/32
- [2] Р. М. Галаган, С. М. Андреев, В. Ф. Петрик, В. Г. Баженов, Ю. Ю. Лисенко, “Виявлення дефектів бетонних конструкцій на основі аналізу зображень за допомогою згорткових нейронних мереж”, *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, Том 34 (73), № 2. с. 1-7, 2023.
- [3] R. Ghali, MA. Akhloufi, “Deep Learning Approaches for Wildland Fires Remote Sensing: Classification, Detection, and Segmentation”, *Remote Sensing*. 2023; 15(7):1821. DOI: 10.3390/rs15071821
- [4] FIRE Dataset. [Online]. Available: <https://www.kaggle.com/datasets/phyllake1337/fire-dataset/data>. [Accessed Apr. 10, 2024]

УДК 004.89

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ІНФОРМАЦІЙНО-ДІАГНОСТИЧНИХ СИСТЕМАХ, ПРИЗНАЧЕНИХ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ КРИЛА ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

¹⁾Коломійцев О. В., ²⁾Сайко В. Г., ²⁾Комаров В. О.

¹⁾Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
Харків, Україна

²⁾Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, Київ, Україна
E-mail: alexus_k@ukr.net, vladimir@komarov.in.ua, vgsaiko@gmail.com

Найближче десятиліття розвитку авіабудування країнах із розвинутою авіаційною промисловістю ознаменується створенням літака п'ятого покоління. Про це свідчать багаточисельні публікації у відкритому друку. Аналіз цих публікацій дає підстави вважати, що експлуатуючі організації під час освоєння літаків п'ятого покоління зіштовхнуться із суттєвими відмінностями у забезпеченні їхнього технічного обслуговування проти літаків попередніх поколінь. Ці відмінності, в першу чергу, пов'язані з необхідністю розробки та впровадження відповідних методів штучного інтелекту (ШІ) та інтегрованих засобів контролю технічного стану літака як цільно функціонуючого об'єкта. Для забезпечення ефективності кроків їх удосконалення у цьому напрямку,

Секція 7. НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ,

261

ТЕХНІЧНА ТА МЕДИЧНА ДІАГНОСТИКА, ПІДГОТОВКА ФАХІВЦІВ ГАЛУЗІ

актуальним є розробка та впровадження інформаційно-діагностичної системи забезпечення обслуговування літаків, заснованої ШІ. Це буде практичною конкретизацією основних положень концепції розвитку системи експлуатаційного контролю технічного стану літальних апаратів (ЛА), яка включає як розробку та впровадження інформаційної підтримки життєвого циклу виробів авіаційної техніки (АТ), так і розробку інформаційно-діагностичної системи неруйнівного контролю для перевірки технічного стану конструкцій планера ЛА з метою виявлення експлуатаційних пошкоджень у силових елементах високонавантажених консольно закріплених конструкціях планера ЛА, а саме, крила та хвостового оперення.

Мета роботи. Головну роль у вирішенні завдань контролю технічного стану літаків п'ятого покоління відводиться бортовій автоматизованій системі контролю (БАСК), у якій використовуються методи ШІ. До складу БАСК також має входити обладнання для технічної діагностики конструкції за параметрами, які є найбільш інформативними. Такими параметрами є частоти власних коливань та форми коливань конструкції, що діагностується.

Матеріали та методи. Штучний інтелект (artificial intelligence) вже торкнувся таких тем, як інтелектуальний моніторинг інфраструктури, збирання та обробки великих обсягів інформації, управління знаннями, технічні та медичні системи діагностики, навчання, поведінковий аналіз, розумні платформи тощо. В даний час багато виробників АТ спробували нові технології аналізу даних і виявили для себе, що їх впровадження не такий простий процес і необхідно докласти багато зусиль щодо його реалізації. Тут варто відзначити, що для досягнення успіху в таких проєктах потрібен досить високий рівень інформатизації системи неруйнівного контролю, хороша аналітика в предметній галузі і тверезий погляд на все різноманіття систем діагностування, включаючи їх застосування до різного типу об'єктів контролю. Очікується, що ШІ в авіації забезпечить безпечну, ефективну та надійну систему неруйнівного діагностичного контролю. Системи ШІ в авіації повинні бути розраховані на роботу з джерелами слабоформалізованих мультимодальних даних, що відрізняються великими обсягами, високою мінливістю та фрагментарністю. Уніфікація форматів представлення цих даних, процедур їх зберігання, передачі, обробки та відображення забезпечує підвищення ефективності інтеграції систем ШІ з іншими інформаційними системами та як наслідок – підвищення ефективності застосування технологій ШІ для вирішення різних завдань діагностування технічного стану консольно закріплених конструкцій планера ЛА – крила та хвостового оперення.

Результати та обговорення. Впровадження ШІ у систему технічної діагностики покликане мінімізувати ризики у сфері безпеки польотів. В основі методу лежить використання передиктивної аналітики – за її допомогою можна передбачити поведінку техніки у майбутньому. Наприклад, ще на етапі збирання ЛА система має бути здатна виявити потенційний дефект, який може

спровокувати відмову обладнання. У ході техобслуговування чи ремонту система зможе виявляти чинники, які впливають на стан техніки, і передбачати можливі аварійні ситуації, дозволяючи заздалегідь усувати їх причини. Наявність об'єктивної та повної інформації про першопричини можливих відмов АТ на рівні технологічних процесів дозволить запобігти серйознішим подіям. Адже там, де збудовано технологічний процес, забезпечена безпека польотів. Для створення інноваційної системи прогнозування технічного стану АТ необхідно провести масштабну роботу зі збирання та оцифрування виробничих показників. Зокрема, будуть аналізуватись як обсяг виробництва, параметри технологічних процесів, швидкість, так і даних діагностування. На основі отриманих даних «розумна» система вивчить процеси виробництва та експлуатації, вирахує їх оптимальні параметри та зможе видавати рекомендації оператору. ШІ дозволить створити математичну модель виробничого процесу, яка потім може інтегруватися до автоматизованої системи управління технологічним процесом діагностування (з використанням нових методів неруйнівного контролю, наприклад, таких, як частота власних (авторезонансних) коливань (ЧВК)).

Впровадження ШІ дозволить вирішити безліч питань на всіх етапах життєвого циклу військової АТ, починаючи з моменту її проектування. Завдяки новим технологіям оптимізуються роботи з техобслуговування АТ, стане менше простоїв, а експлуатант матиме повну інформацію про стан АТ і, що особливо важливо, зможе запобігти відмовам техніки навіть при наявності пошкоджень, включаючи бойові. Авіаційні фахівці вважають, що оснащення ШІ заздалегідь закладеними правилами, дозволить забезпечити більш високий рівень безпеки експлуатації АТ. Зокрема, комп'ютерна програма безперешкодно зможе зробити діагностування ТС конструкції ЛА. Інформаційно-діагностична система неруйнівного контролю (ІДСНК), що створена для перевірки ТС планера ЛА і заснована на ШІ, призначена для контролю ТС літаків протягом усього періоду їх експлуатації та інформаційного забезпечення обслуговування парку літаків за їх ТС.

До завдань (ІДСНК) щодо контролю ТС літаків відносяться:

- отримання, збирання та обробка діагностичної інформації з оцінюванням параметрів технічного стану конструктивних елементів планера літака на всіх етапах його експлуатації;
- контроль технічного стану функціонування конструктивних елементів планера літака із встановленням фактів виходу їх параметрів за індивідуальні допуски об'єкта контролю (поглиблений контроль працездатності – наявність експлуатаційних ушкоджень);
- пошук відмов (виявлення появи експлуатаційних пошкоджень у силових елементах конструкції) та визначення при цьому норм виходу контрольованих параметрів за встановлені експлуатаційні та індивідуальні для конкретного об'єкта контролю;

– оцінка тенденцій зміни показників поточного технічного стану консольно закріплених конструкцій планера ЛА для визначення обсягу та термінів профілактичних робіт (прогнозування).

До складу ІДСНК має входити діагностичне обладнання (обладнання для порушення коливань конструкції ЛА з власною частотою) та контрольньо-перевірочне обладнання (ЕОМ або бортовий пристрій реєстрації діагностичних параметрів, пристрій обробки інформації, апаратура, що записує, та ін.).

Ця система повинна представляти собою сукупністю взаємопов'язаних вимірювальних, обчислювальних та інформаційно-довідкових засобів забезпечення технічного обслуговування літака, що базуються на сучасних комп'ютерних технологіях. Вказана система (з урахуванням аналізу на наземному пристрої обробки польотної інформації, накопиченої в бортовому пристрої реєстрації) дозволить контролювати цілісність крила літака та максимально забезпечить можливість оперативного прийняття рішення про виліт літака в черговий політ (з наявним рівнем залишкової міцності крила). Крило та конструктивні елементи хвостового оперення літака передбачається діагностувати на наземних автоматизованих засобах контролю, використовуючи такі діагностичні параметри, як ЧВК, амплітуда коливань та форми коливань. За допомогою ІДСНК, використовуючи обладнання для збудження коливань (ОЗК) консольно закріплених конструкцій планера ЛА з власною частотою (із збудженням у комплексі цим обладнанням згинальних та крутильних форм коливань щодо осі жорсткості конструкції, що випробовується), можна буде здійснювати:

- перевірку достовірності результатів контролю, отриманих за допомогою ОЗК;
- діагностування крила, кіля та стабілізатора складу літака (з накопиченням при цьому баз даних (БД) про технічний стан парку обслуговуваних літаків за весь попередній період їх експлуатації);
- періодичну перевірку високонавантажених конструкцій планера літального апарату в умовах експлуатації (включаючи діагностування ЛА безпосередньо на стоянці або укрітті);
- збір інформації та формування БД про технічний стан крила, кіля та стабілізатора літака протягом усього періоду його експлуатації;
- обробку БД для вирішення завдань прогнозування технічного стану крила, кіля та стабілізатора літака для забезпечення його експлуатації за технічним станом, використовуючи бортову ЕОМ;
- інформаційну підтримку прийняття рішень про роботи з технічного обслуговування ЛА за результатами контролю його технічного стану за допомогою нових методів неруйнівного контролю.

Контроль технічного стану ЛА за допомогою ІДСНК повинен здійснюватися безперервно за всіх видів технічного обслуговування літака на основі комплексної обробки діагностичної інформації, що надходить від

інформаційно-вимірювальної системи ІДСНК. Діагностична інформація від різних джерел перетворюється в ЕОМ або бортовому пристрої реєстрації діагностичних параметрів, а також у пристрої обробки інформації, цифровий код відповідними пристроями узгодження.

Висновки. Таким чином, запропонована методика дозволить оперативно та з мінімальною трудомісткістю отримати достовірну інформацію про технічний стан пошкодженої конструкції – про її залишкову міцність, а це, у свою чергу, дозволить вирішити дуже важливе питання – чи виконувати локальний ремонт конструкції, чи достатньо лише відновити аеродинаміку. При цьому буде забезпечена можливість випуску літака в бойовий виліт з рекомендаціями льотчику щодо зниження швидкості польоту і допустимих перевантажень на величину, що відповідає зниженню міцності конструкції відносно максимальної, щоб не перевищити навантаження на пошкоджене крило. Для цього методика має враховувати коливання палива в крильових паливних баках, які вносять додаткове навантаження на крило.

Ключові слова: штучний інтелект, літальний апарат, контроль технічного стану літака, пошкодження конструкції, залишкова міцність крила, автоматизовані засоби контролю, діагностування, методи неруйнівного контролю, частота власн

UDC 535.317

IMAGE QUALITY THERMAL STABILIZATION FOR IR DIOPTRIC LENSES

Muraviov O. V.

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
E-mail: stals98@ukr.net*

Heat vision equipment is widely utilized in metrology, military engineering, and scientific research. Infrared (IR) devices are frequently employed in challenging environmental conditions. Several scientific publications focus on the design of thermally independent lenses. For instance, in [1], methods of opto-mechanical passive athermalization of optical systems are addressed. However, insufficient attention has been given to the passive optical athermalization algorithm. An analysis of these publications reveals a predominant emphasis on opto-mechanical methods of athermalization, while passive optical athermalization is increasingly favored due to several advantages: simplicity of construction, high accuracy and reliability, and reduction of mass and dimensional characteristics. Notably, the notable benefit of optical methods is that the impact of mechanical structural components on thermal defocusing can be minimized by utilizing materials with a negligible temperature coefficient of linear expansion for the mechanical parts of optical devices. Currently, there exist only general recommendations for use in the design of athermalized

lenses, while the question of mathematical algorithms for passive optical athermalization remains unresolved.

During the design of lenses for IR equipment, three-component optical systems are commonly employed by developers. These systems achieve good image quality without requiring aspherical surfaces. However, ensuring consistent image quality across a broad temperature range in these configurations has not been adequately addressed. This study focuses on the advancement of a mathematical framework that enables the design of athermalized and achromatic IR triplets, with the capability to minimize required image aberrations under uniform temperature distribution within the optical system [2].

The operational standards for such equipment frequently necessitate a working temperature range of ± 50 °C, as the primary environmental factor affecting the image quality of IR technology is the temperature field variation [3]. This results in thermal defocusing within the optical system, characterized by alterations in the size of the back focal length and image thermal aberrations. Consequently, there is a notable decline in resolution and degradation of key lens features. Therefore, ensuring thermal stabilization of image quality amidst environmental temperature fluctuations is a crucial and pressing issue that must be addressed during the design phase of IR devices [4, 5].

The issue of thermal stabilization can be addressed through the utilization of active, semi-active, and passive methods. Passive optical athermalization offers significant benefits, including high reliability, lack of moving parts and manual adjustment, minimized weight and size, and simple design. The promising development prospects in this area are also driven by the continuous expansion of the list of optical materials for the IR spectral range.

The creation of an athermalized dioptric objective relies on combinations of optical materials with varying signs of the thermo-optical constant. This approach enables the minimization of image aberrations and the selection of an optimal material for the supporting structure of lenses during thermal stabilization. The proposed method facilitates the synthesis of athermalized IR objectives, comprising two or three lenses, utilizing just two distinct optical materials [6].

Temperature variations in the environment have a significant impact on the characteristics of IR technology, influencing the quality and informativeness of the images. Therefore, it is advisable to incorporate athermalization of the optical system during the design of highly precise and sensitive devices. Athermalization and achromatization of IR triplets can be achieved through the selection of compositions of optical materials. Additionally, athermalization minimizes the primary image aberrations of IR dioptric lenses.

Constructed using the devised method, an IR triplet with a focal length of 50 mm, a relative aperture of 1:1, and a field of view angle of 12° demonstrates a variation of 4 μm in back focal length across the temperature range of -20°C to +60°C. This

change is significantly lower, by 1-2 orders of magnitude, compared to non-athermalized lenses possessing similar operational characteristics [7].

Future research in this field should strive to enhance the design methods for achromatic and athermalized infrared optical systems. The objective is to develop an algorithm capable of obtaining a comprehensive set of design parameters for optical systems without necessitating additional optimization, minimizing optical system aberrations.

Keywords: image quality thermostabilization, passive optical athermalization, dioptric lenses, infrared optical system.

References

- [1] J. Tejada, “Passive athermalization: maintaining uniform temperature fluctuations”, *Optical Design*, pp. 341-345, 2006.
- [2] О. К. Кучеренко, О. В. Муравйов, Д. О. Остапенко, "Вплив температури на аберацийні властивості ІЧ об'єктивів", *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*, № 1, с. 99-105, 2013.
- [3] О. В. Муравйов, В. Ф. Петрик, Ю. Ю. Лисенко, Г. А. Богдан, А. В. Наконечна, "Автоматизація методу термографічної діагностики патологій організму людини", *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, №1, с. 47-53, 2022.
- [4] Hudyma M. Russell, “Athermal MWIR objectives”, *SPIE*, vol. 2540, pp. 229-235, 1995.
- [5] А. В. Муравьев "Основные тенденции, проблемы и перспективы развития дисплейной наноэлектроники", на 2-га наук.-техн. конф. з міжнародною участю *Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському союзі*, Польща, Люблін, 2018, с. 10-11.
- [6] О. К. Кучеренко, А. В. Муравьев, "Методы пассивной атермализации и ахроматизации двухкомпонентных оптических систем", *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування*, вип. № 43, с. 46–53, 2012.
- [7] А. В. Муравьев "Пассивная атермализация оптической системы медицинского термографа", *TRENDS OF MODERN SCIENCE*, vol. 15, pp. 88-91, 2018.

UDC 543.32:621.039.75

THE USE OF MAGNETOMETRIC GRADIOMETERS IN EXPLOSIVE ORDNANCE DETECTION

Momot A., Yakotiuk V.

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
E-mail: drewmomot@gmail.com*

Today, Ukraine is one of the most explosively contaminated countries in the world. Since the beginning of the full-scale invasion of the Russian Federation, the area of potentially contaminated territories that need to be surveyed for the risk of mines and explosive hazards is about 174,000 square kilometres [1]. More than 5 million Ukrainians live in these contaminated areas and face the threat of mines every day. This poses a serious threat to the lives and health of civilians and complicates the work of law enforcement agencies and humanitarian organisations.

Thus, the task of unexploded ordnance (UXO) disposal and demining in Ukraine is extremely relevant and important in the context of ensuring the security and

stability of the country, protecting the population and ensuring economic and social development. There are quite a few organisations in the world, apart from military engineering troops, that solve practical tasks of searching for UXOs and demining. However, given the complex nature and complexity of the problem, there is no single optimal way to detect and identify UXOs [2].

Although chemical (smell) and biological (dogs, rats and even insects) search methods are used, they are clearly subjective. This leads to low reliability of the results. In practice, physical methods of detecting UXO are mostly used: active electromagnetic sensing of the near-surface soil layer with electromagnetic pulses and sinusoidal fields (metal detectors with a frequency of 2-50 kHz, ground penetrating radar with a frequency of 100-900 MHz), seismic waves and neutron radiation, recording of anomalies in electrical conductivity and soil density, measurement of infrared and gravitational fields, etc. Each of the methods has its advantages and disadvantages due to the physical characteristics of the processes on which it is based [3].

Today, the most widely used are harmonic (FM - frequency domain) or pulsed (TD - time domain) active metal detectors or metal detectors, the principle of operation of which is based on the registration of a secondary electromagnetic field induced by Foucault currents in a metal body under the influence of an excited primary field. The widespread use of metal detectors is due to three main reasons: significantly lower cost, the ability to detect any metal and an expanded range of applications, such as treasure hunting, underground pipelines and cables, and archaeology.

Among the methods of detecting UXOs, a significant place is occupied by the search for magnetic anomalies (MAD – magnetic anomaly detection), which are created by ferromagnetic metal shells of the vast majority of UXOs [4]. At the same time, no caseless explosive devices or special ammunition are detected. However, they have the lowest destructive power and are just as unstable to detect by other methods. MAD is one of the deepest search methods, allowing for the detection of UXO (e.g., large bombs, landmines) at depths of up to 8 metres. In addition, the magnetometric method is passive, which makes it impossible to detonate a UXO as a result of the physical fields used in active sensing.

In the literature, the method of searching for UXOs based on the detected anomalies of the Earth's magnetic field is considered one of the most promising [5]. To implement this method, magnetometers are used. A magnetometer is a device designed to measure the characteristics of the magnetic field in a certain area of space. In the tasks of detecting UXOs, the most informative are magnetometric gradiometers, which allow determining the magnetic field gradient depending on the position of the sensor in space.

The basic physical principle of a gradiometer is based on measuring the strength of the magnetic field at different points in space and then comparing these values. To do this, gradiometers use several sensors that can respond to changes in the magnetic

field and convert these changes into a measurable electrical signal. This signal is then processed by an electronic system. Knowing the distance between the sensors and the magnetic field strength at these points, the magnetic field gradient can be estimated. Changes in the magnetic field in space can be caused by various factors, such as proximity to magnetic objects, changes in the magnetic properties of soil or rocks, geometric configuration of the magnetic field source, etc.

The method of magnetometric search for UXOs is implemented using passive "vector" gradiometers, which eliminate the effect of the Earth's constant (main) magnetic field, which has a slight spatial gradient, to the maximum extent possible. Such devices use 2 identical sensors. The sensors are usually ferroelectric probes, but Hall sensors or magnetoresistors can also be used. These sensors are spaced along the sensitivity axis by 25-170 cm and register a gradient of magnetic anomalies, possibly related to the UXO [6].

There are also non-gradiometric detectors. They are based, as a rule, on quantum magnetometers with optical pumping of caesium or potassium vapour. Such devices are used mainly to obtain a map of the magnetic field of the area. After that, it is possible to search for UXOs using the map of magnetic anomalies. However, quantum-optical devices are more likely to be classified as scientific devices and require careful and more competent handling than is required for conventional search devices. Another disadvantage is their significantly higher cost compared to even the most sensitive ferroelectric gradiometers [7].

Available scientific papers and reports indicate that the best performance in detecting UXOs is provided by devices that combine passive magnetometric and active electromagnetic detection principles. Such systems detect any type of metal and are designed as a line of sensors. They are mounted on a bicycle or car base and are expensive and difficult to manufacture. Table 1 shows the comparative characteristics of passive magnetometers and active metal detectors, analysed based on [4-8].

Thus, we can highlight the advantages of passive gradiometers over active metal detectors:

- 1) On average, the maximum depth of the search for UXO in steel (ferromagnetic) shells is 2 times greater than in metal detectors;
- 2) independence of the result from soil conductivity, climatic conditions, and water availability;
- 3) high accuracy of target localisation and the potential for reliable prediction of the depth, type and orientation of the UXO in space;
- 4) reduced weight, which makes it easier to search by placing it on drones or moving platforms to increase the speed of scanning the area.

A promising area of development is the use of passive gradiometers placed on UAVs. This approach can significantly reduce the time required to map magnetic anomalies. If a multi-sensor system is used, it is possible to estimate the depth, size (magnitude) and orientation of a possible UXO in the ground.

Table 1: Comparative characteristics of passive gradiometers and active metal detectors

<i>Characteristics of the device</i>	<i>Assessment.</i>	
	<i>Passive gradiometer</i>	<i>Active metal detector</i>
Metal detection	black only (ferromagnetic)	Any
Search depth, typical/maximum, m	3 / 8	0,6 / 3
The effect of soil conductivity (rain, snow) on work efficiency	no	significant
Effective operation on uneven terrain	high	moderate
Typical target localisation accuracy, cm	3 - 5	10 - 15
Assessment of the depth and type of the UXO	yes	minor
Estimating the size and orientation of the UXO in the soil	yes	minor
Ability to estimate the type of metal	yes	minor
Typical weight of the device, kg	3 - 5	5 - 9

This will facilitate the process of further demining. However, only humanitarian demining provides such opportunities. In combat or close to combat conditions, when the task is to detect UXO on the move, mapping magnetic anomalies is extremely difficult. However, an increase in the number of gradiometers simultaneously involved in the search will not only proportionally increase the width of the sensitivity zone, but also more accurately identify the location of the possible object.

Thus, magnetometric gradiometers are highly accurate and sensitive, allowing the detection of even the slightest changes in the magnetic field that may indicate the presence of unexploded objects. They are quite efficient and fast, which speeds up the search and clearance process. Another important advantage is their mobility and compactness, which makes them easy to carry and use in different areas, including hard-to-reach areas or conditions with a large number of explosive objects.

In addition, magnetometric gradiometers can be integrated with other technologies, such as UAVs or demining robots. This can be used to create an integrated search and clearance system that reduces scanning time and risks for the professionals involved. Further research can also be devoted to the use of artificial intelligence methods to improve the accuracy of localizing magnetic anomalies created by explosive objects.

Keywords: non-destructive testing, magnetometers, gradiometers, demining.

References

- [1] I. Osmolovska, "Walking on Fire: Demining in Ukraine," GLOBSEC, Apr. 2024. Accessed: 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.globsec.org/sites/default/files/2023-04/Demining%20in%20Ukraine%20report%20ver5%20web.pdf>.
- [2] G. Fedorenko, H. Fesenko, V. Kharchenko, Ihor Kliushnikov, and Ihor Tolkunov, "Robotic-biological systems for detection and identification of explosive ordnance: concept, general structure, and models," *Radioelektronni i komp'uterni sistemi*, no. 2, pp. 143-159, May 2023, DOI: 10.32620/reks.2023.2.12.

- [3] V. Yakotiuk and A. Momot, "Analysis of the effectiveness of methods of searching for explosive objects using UAVs," in *Proceedings of the XIX All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Efficiency and Automation of Engineering Solutions in Instrumentation"*, Kyiv: IMF, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Dec. 2023, pp. 373-376.
- [4] H. Liu, X. Zhang, H. Dong, Z. Liu, and X. Hu, "Theories, Applications, and Expectations for Magnetic Anomaly Detection Technology: A Review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 16, pp. 17868-17882, Aug. 2023, DOI: 10.1109/jsen.2023.3294498.
- [5] X. Zheng, Y. Tian, and B. Wang, "A Magnetic Gradient Tensor Based Method for UXO Detection on Movable Platform," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 61, pp. 1-9, Jan. 2023, DOI: 10.1109/tgrs.2023.3257411.
- [6] Mark David Wigh, Mick Emil Kolster, Thomas Mejer Hansen, and Arne Døssing, "Classification of UXO and non-UXO from magnetic anomaly data: a case study on inversion of drone magnetic data from Rømø, Denmark," *Geophysical Journal International*, vol. 234, no. 2, pp. 915-932, Mar. 2023. DOI: 10.1093/gji/ggad097.
- [7] H. Wang *et al.*, "Overhauser Sensor Array Based 3-D Magnetic Gradiometer for the Detection of Shallow Subsurface Unexploded Ordnance," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 1-11, Jan. 2023, DOI: 10.1109/tim.2023.3277942.
- [8] O. V. Muraviov, I. O. Dovbysh, R. M. Galagan, H. A. Bohdan, and A. S. Momot, "Development prospects of technologies and increasing autonomy level of UAV," *Vчені zapiski Tavrijs'kogo nacional'nogo unіversitetu іmenі V. І. Vernads'kogo*, vol. 1, no. 2, pp. 199–205, Jan. 2023, DOI: 10.32782/2663-5941/2023.2.1/32.

УДК 620.179

СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ В ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛАХ З ПІДВИЩЕНОЮ ПРЕЦИЗІЙНІСТЮ

Богдан Г. А., Петрик В. Ф.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: bogdangalya@gmail.com

Композитні порошкові матеріали є цікавим напрямком в наукових дослідженнях та промисловому застосуванні. Вони поєднують властивості різних матеріалів для отримання певних властивостей або виготовлення продуктів з підвищеною ефективністю. Їх технологія виготовлення може варіюватися залежно від типу матеріалів, які використовуються і властивостей, які потрібно отримати в кінцевому продукті. Але загальним є те, що процес виготовлення складний та містить багато стадій. На кінцеві фізико-механічні характеристики (ФМХ) матеріалу впливають технологічні параметри кожної із стадій виготовлення. А отже, для визначення оптимальних технологічних параметрів виготовлення композитних порошкових матеріалів необхідно оцінювати зміну їх ФМХ на кожному етапі розробки [1].

Перспективним для цього є використання ультразвукових методів неруйнівного контролю [2], тому що ці методи дозволяють оцінити більшу кількість ФМХ по вимірним значенням швидкості поширення ультразвукової

хвилі (УЗХ) в матеріалі по відомим математичним залежностям. Наприклад модуль пружності пов'язаний з повздовжньою швидкістю поширення УЗХ виразом:

$$C_l = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}},$$

де C_l – швидкість поширення повздовжніх акустичних хвиль у матеріалі; ρ – густина матеріалу; ν – коефіцієнт Пуассона.

Визначення швидкості поширення УЗХ відноситься до непрямих методів вимірювання, тому що безпосередньо, існуючі системи вимірюють час проходження УЗХ в матеріалі. І по відомій формулі розраховують швидкість поширення УЗХ:

$$C = \frac{h}{t - t_0},$$

де h – товщина виробу в точці прозвучування; t – вимірний час; t_0 – систематична часова поправка.

Враховуючі неоднорідність внутрішньої структури порошкових матеріалів та незначні розміри досліджуваних зразків виникає потреба в створенні прецензійної системи визначення швидкості поширення УЗХ.

Одна з можливих реалізація такої системи представлена на рис. 1. Вона реалізована на базі цифрового осцилографу та генератора сигналів.

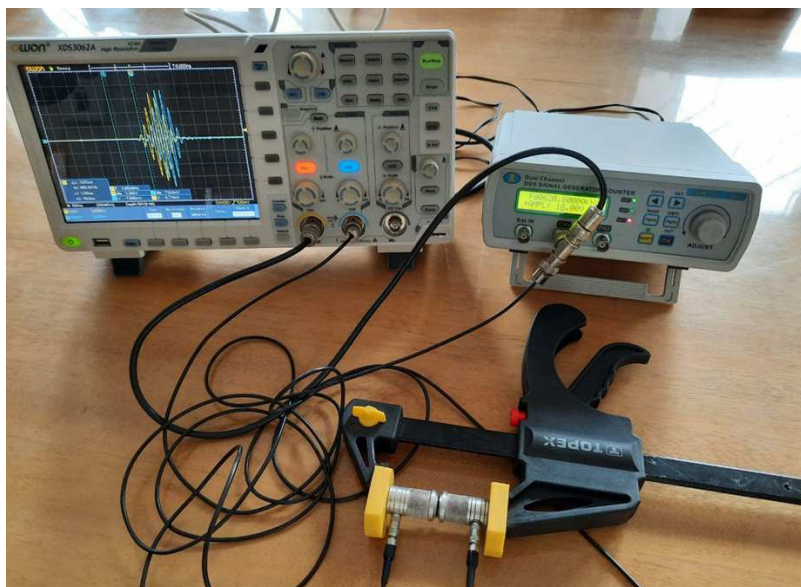


Рис. 1. Системи вимірювання швидкості поширення ультразвуку в порошкових композиційних матеріалах з підвищеною прецизійністю

Необхідні обчислення проводять на ПК. Синхронізація зондуючого та прийнятого імпульсу відбувається за допомогою генератора (DDS) MHS-5200. Збудження ультразвукового датчика проводиться синусоїдальним сигналом за частоти, яка відповідає резонансній.

При розрахунку швидкості поширення УЗХ враховується систематична часова поправка.

Запропонована система дозволяє зменшити систематичну та методичну похибку вимірювання часу поширення УЗХ. Вона проста в реалізації і не потребує використання дорогого обладнання. З її допомогою можна проводити оцінку зміни ФМХ порошкових матеріалів на всіх етапах їх виготовлення.

Ключові слова: неруйнівний контроль, ультразвук, порошковий матеріал, система.

Література

- [1] Г. А. Богдан, “Вдосконалення ультразвукового методу контролю фізико-механічних характеристик порошкових матеріалів”, *автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук*, Київ, Нац. техн. ун-т України “Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського”, 2017.
- [2] Г. А. Богдан, “Автоматизована система визначення фізико-механічних характеристик порошкових матеріалів”, на *XXI Міжнар. наук.-техн. конф. Приладобудування: стан і перспективи*, Київ, 2022, с. 202–204.

УДК 681.5, 620.1

АНАЛІЗ ВЕРСІЙ СТАНДАРТУ EN ISO 9712 З ПОГЛЯДУ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ З НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

¹⁾Лисенко Ю. Ю., ²⁾Алексієв О., ¹⁾Куц Ю. В.

¹⁾Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна

²⁾Інститут Механіки Болгарської Академії Наук, Софія, Болгарія

E-mail: j.lysenko@kpi.ua

Неруйнівний контроль (НК) вважається одним з ключових етапів у забезпеченні безпеки та надійності різноманітних технічних об'єктів, починаючи від авіаційної та автомобільної промисловості й закінчуючи будівництвом. Стандарт EN ISO 9712 має велике значення, оскільки він встановлює вимоги до кваліфікації персоналу з НК, дотримання яких є необхідною умовою забезпечення високої якості та надійності проведення НК.

З розвитком технологій виробництва, зміною вимог щодо їх безпеки та якості, розширенням можливостей засобів НК, стандарт EN ISO 9712 регулярно оновлюється та модифікується. Введення нової версії стандарту EN ISO 9712:2022 є важливим кроком у розвитку системи кваліфікації та сертифікації персоналу з НК, зумовленим необхідністю врахування можливостей сучасних технологій НК та усуненням недоліків попередньої версії стандарту. В нашій країні в червні 2023 року, введено в дію оновлену версію вказаного стандарту. Проте до 2026 року залишено діючим попередній стандарт [1, 2] для плавного переходу між версіями, адаптації до змін та підготовки до їх впровадження.

У доповіді висвітлено результати порівняльного аналізу версій стандарту EN ISO 9712 за 2012 та 2022 роки з метою визначення основних змін та їх впливу на процес підготовки, кваліфікації та сертифікації персоналу з НК.

Оновлений текст стандарту містить значні зміни в пункті про сертифікаційний орган, що стосуються вимог щодо його діяльності. Поліпшення спрямовані на підвищення якості та надійності процесу сертифікації персоналу з НК. Однією з ключових змін є умова незалежності сертифікаційного органу від будь-якої окремої організації, що забезпечує об'єктивність та недискримінаційність сертифікаційного процесу. Також встановлено обов'язок публікації інформації про обсяг схеми сертифікації та загальний опис процесу сертифікації. Це забезпечує прозорість та доступність інформації для всіх зацікавлених сторін.

Уточнені та розширені вимоги щодо забезпечення безпеки всіх матеріалів екзаменації та запобігання їх використанню в навчальних цілях. Це гарантує конфіденційність та об'єктивність проведення екзаменацій.

Встановлено обов'язок проведення екзаменацій тільки у присутності та під контролем авторизованого наглядача сертифікаційного органу з метою збереження їх неупередженості та об'єктивності. Ця умова встановлена згідно з вимогами стандарту та відповідає найкращим міжнародним практикам у сфері кваліфікації та сертифікації технічного персоналу.

У розділі стандарту про навчання оновлена версія вносить суттєві зміни порівняно з попередньою. Основні зміни стосуються формату навчання, тривалості курсів та можливостей додаткової підготовки кандидатів.

Порівнюючи стару та нову версії стандарту, можна визначити, що стара версія передбачала проведення теоретичного навчання виключно у форматі аудиторних занять з викладачем, тоді як нова версія дозволяє використовувати різні формати навчання – дистанційне навчання, самостійне навчання або комбінований формат. Практичне навчання за обома версіями стандарту здійснюється виключно у форматі занять з викладачем шляхом виконання практичних вправ [3].

Щодо тривалості навчання, якщо за попередньою версією мінімальна тривалість навчання чітко визначалася залежно від рівня та методу НК, в новій версії передбачено можливість зменшення тривалості навчання на 50% за умови виконання певних критеріїв. Таке зменшення можливе для кандидатів, які мають вищу технічну або наукову освіту відповідного профілю (наприклад, хімія, математика або фізика), або завершили навчання на відповідних інженерних чи наукових факультетах коледжів чи університетів в продовж принаймні двох років [3, 4].

Додатковою можливістю для кандидатів рівня 3, за обома версіями стандарту, є можливість додаткової підготовки, включаючи відвідування інших навчальних курсів, конференцій або семінарів, а також самостійне вивчення спеціалізованих матеріалів.

Введення оновленої версії стандарту EN ISO 9712:2022 є важливим кроком у розвитку системи кваліфікації та сертифікації персоналу з НК. Зміни, внесені до стандарту, спрямовані на поліпшення якості та надійності проведення НК. Встановлення обов'язкової незалежності сертифікаційних органів, збільшення прозорості та доступності інформації, а також можливість зниження тривалості навчання на 50% – лише деякі з ключових аспектів нового стандарту. Разом із цим, стандарт передбачає ряд інших важливих змін, які також сприятимуть підвищенню якості підготовки та кваліфікації персоналу в галузі НК.

Ключові слова: неруйнівний контроль, EN ISO 9712, стандарт, сертифікація, кваліфікація персоналу, тривалість навчання.

- [1] ISO 9712:2012(en), Non-destructive testing – Qualification and certification of NDT personnel. Доступ: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9712:ed-3:v1:en>
- [2] ISO 9712:2022(en), Non-destructive testing — Qualification and certification of NDT personnel. Доступ: <https://www.iso.org/standard/79334.html>
- [3] I. Lysenko, Y Mirchev, Y Kuts, O. Levchenko, “Analysis of normative documentation on the use of array eddy current probes”, на XXII Міжнар. наук.-техн. конф. Приладобудування: стан і перспективи, Київ, 2023.
- [4] ISO/TS 25108:2018(en), Non-destructive testing — NDT personnel training organizations. Доступ: <https://www.iso.org/standard/45642.html>

УДК 620.179.14

НЕЙРОННІ МЕРЕЖИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ СТАЛЕВИХ ВРАЗКІВ СТРУКТУРОСКОПОМ НА БАЗІ ВИЩИХ ГАРМОНІК

Баженов В. Г., Калениченко Ю. О., Рацебарський С. С.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: vgbazhenov@gmail.com

Структуроскопія – це дуже важлива галузь промисловості, яка дозволяє знаходити й попереджувати появу дефектів, прогнозувати ресурс роботи виробів, визначати їх механічні характеристики.

Відомо що найбільш інформативною серед фізичних неруйнівних методів є вихрострумова структуроскопія на базі методу вищих гармонік, яка дозволяє отримати велику кількість інформативних ознак, до яких входять результати вимірювань амплітуди та фази не тільки першої гармоніки, але й вищих, до дев'ятої включно при покроковій зміні сигналу збудження первинної котушки. Подібні системи потребували використання великого парку вимірювальних приладів (включаючи фазометри), що значно обмежувало, або робило неможливим використання цього методу і також унеможлиблювало його автоматизацію. Проте розвиток мікроелектронних систем за останні роки, таких як ПЛІС (FPGA), швидкодіючі аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі, зробило їх доступними для масового комерційного використання, що дозволило авторам доповіді створити автоматичну цифрову

систему структуроскопії на базі метода вищих гармонік., яка дозволяє автоматично отримувати цифровий масив даних і будувати графіки змін амплітуд і фаз контролюємих гармонік в залежності від амплітуди збуджуючого сигналу котушки

Проте, аналіз отриманих значень амплітуд та фаз гармонік сигналу відгуку все ще є надзвичайно складною проблемою, яка потребує високої кваліфікації оператора та часу на обробку, що унеможлиблювало їх використання в поточному контролі. В зв'язку з вищезазначеним в докладі розглядається з можливість використання нейронних мереж для визначення механічного параметру твердості сталевих зразків

В якості структуроскопу, який використовувався для вимірювання сталевих зразків було використано діючу модель, розроблену та запатентовану командою, до якої входять автори доповіді[1,3]. Вимірювання, що використовувалися для експериментів, було проведено на частоті 5 кГц та амплітудою збуджувального сигналу 23 В. В якості даних було використано амплітуди та фази перших п'яти непарних гармонік.

Проте, постає проблема використання кута в нейронній мережі, яка полягає в тому, що кут в градусах визначається дійсним числом між 0 та 360, але геометрично 0 та 360 це одне й те саме. Але якщо використовувати кут як стандартне дійсне число то нейронна мережа зробить висновок, що 0 та 360 є дуже різними значеннями, які максимально віддалені одне від одного. Це призведе до того, що передбачення, які використовують ці екстремуми, будуть значно менш точними.

Одним з методів вирішення цієї проблеми є представлення кута ϕ як пари значень $\sin(\phi)$, $\cos(\phi)$. Таке представлення вирішує три проблеми: забезпечує, що значення 0 та 360 є однаковиими, нормалізує значення вхідних даних до діапазону $[-1; 1]$, та дозволяє роботу з кутами менше 0 та більше 360 через періодичність функцій представлення. Таким чином представлення кута у вигляді двох змінних збільшує розмір вхідного шару з 10 до 15 нейронів, але вирішує проблеми циклічності, нормалізації та обгортки.

В результаті аналізу було встановлено, що для вирішення задач регресії доцільно було використати Фідфорвард (Feedforward) нейронну мережу - найпростіший тип штучної нейронної мережі, яка передає інформацію лише у одному напрямку, від вхідного шару до вихідного шару, без зворотного зв'язку. Це означає, що дані поширюються через мережу без циклічних залежностей.

Важливим кроком під час синтезу моделі є вибір лосс функції, також відомої як функції втрат. Ця функція вимірює рівень помилки, під якою розуміється різниця між прогнозованими значеннями моделі та справжніми значеннями цільової змінної. В контексті машинного навчання вона використовується як квантифікатор того, наскільки модель добре виконує свою задачу та її мінімізація є основною метою тренування моделі. Відомо[2], що в задачах регресії є три найбільш популярних лосс функції:

1. Mean squared error (MSE) – середньоквадратична похибка.

2. Mean absolute error (MAE) – середня абсолютна похибка.

3. Huber loss – лосс функція, яка поєднує між собою переваги MSE та MAE. Вона розраховує MSE за замовчуванням, проте має параметр границі, і якщо MSE перевищує цю границю то значення функції втрачє натомість розраховується через MAE.

Проаналізувавши наведені оптимізатори, видається доцільним використання оптимізатора Adam[2] через його поєднання переваг методів градієнтного спуску RMSProp.

Дані для навчання було набрано на наборі з 9 сталевих зразків, зображених на фіг. 1, які було досліджено на твердість за Роквеллом за шкалою С. Вони мали твердість між 250 та 560 одиниць.

Кожен зі зразків було виміряно 400 разів, що дає нам вибірку даних в 3600 точок. Така вибірка відповідає принципу різноманітності, який потребує щоб різні значення передбачуваної величини були представлені в виборці приблизно в однакових пропорціях.

Відомо, що важливою складовою під час навчання нейронних мереж є перенавчання, яке пов'язане з занадто точним відтворенням тренувальних даних [2].

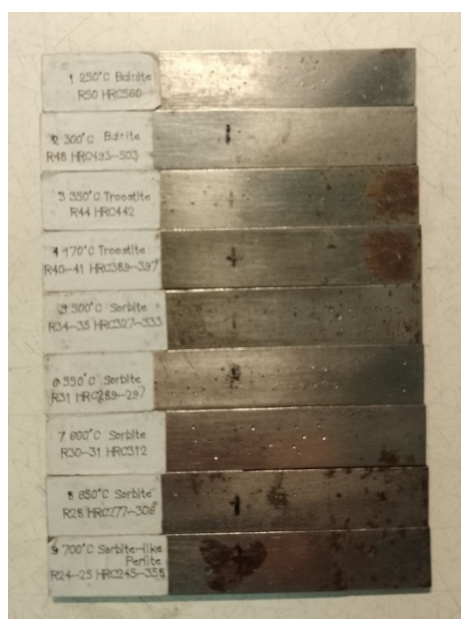


Рис 1. Сталеві зразки

Це призводить до збільшення помилки та втрати узагальнюючих можливостей. З метою вирішення цієї проблеми вибірку було розбито на дві множини: навчальну та тестову. Навчання проводиться лише на навчальній множині, а тестова використовується для перевірки узагальнюючих можливостей мережі. Дані цих множин не перетинаються. Також під час навчання на кожному з кроків виділяється так звана валідаційна множина. На кожному з етапів навчання вона автоматично та випадковим чином

відкидається з тренувальної множини з метою запобігання перенавчанню та поточної перевірки роботи мережі. Архітектура нейронної мережі визначається емпірично. Виходячи з складності задачі, було запропоновано такі характеристики:

- Кількість прихованих прошарків N_l – 2 або 3.
- Кількість нейронів в кожному прихованому прошарку N_p – 64 або 128.

Експерименти, проведені з цими архітектурами, дозволять більш точно визначити напрямок подальших досліджень архітектури. Навчання кожної з архітектур було проведено на однаковій кількості в 400 епох.

Для кожної архітектури було навчено по п'ять мереж, з яких обрано найкращі за показником середньоквадратичної помилки. Результати навчання мереж різних архітектур наведено в таблиці 1.

Як видно з табл.1 найменшу похибку має найбільш складна архітектура. Використання тестового та валідаційного масивів даних значно зменшує можливість перетренування. Менш складні архітектури мають занадто велику похибку щоб їх використовувати. Це дозволяє дати рекомендацію використовувати щонайменше 3 прихованих прошарки з щонайменше 128 нейронами в кожному. Збільшення цих характеристик може призвести до підвищення точності, але тоді перетренування стане більш актуальною проблемою, яка буде потребувати окремих кроків для вирішення. Таким чином на наведеному прикладі (зі зразками з відомою твердістю) визначення твердості можна стверджувати що навчена нейронна мережа може визначати твердість матеріалу з дуже високою точністю і швидкістю при використанні запропонованого структуроскопу.

Таблиця 1. Ефективність навчених моделей в залежності від архітектури

Архітектура	$N_l = 2$	$N_l = 2$	$N_l = 3$	$N_l = 3$
	$N_p = 64$	$N_p = 128$	$N_p = 64$	$N_p = 128$
MSE	185,32	62,487	46,774	14,476
MAE	10,306	5,208	5,884	2,807

Ключові слова: автоматичний цифровий вихрострумний структуроскоп на базі вищих гармонік., архітектури нейронних мереж, похибки вимірювання, твердість, вимірювання фази, амплітуди.

Література:

- [1] В. Г. Баженов, Ю. О. Калениченко, О. Г. Калениченко, В. В. Баженов, “Цифровий спосіб і система визначення структури матеріалу об’єкта”, Патент України на винахід №125416 UA МПК (2022.01) G01N27/72 (2006.01) G01N27/90(2021.01), G01R33/12(2006.01), G01N27/00, G01R33/00. Бюл. №9 від 02.03.2023, Номер заявки а2020 02552 від 23.04.2020.

- [2] В. Г. Баженов, Ю. О. Калениченко, С. С. Рацебарський, “Використання нейронних мереж для визначення твердості сталевих зразків структуроскопом на базі вищих гармонік”, *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, Том 34 (73), №3, 2023.
- [3] В. Г. Баженов, Ю. О. Калениченко, К. А. Гльойнік, “Automated precision amplitudes and phases measurement of polyharmonic eddy current signals of non-destructive testing”, *Вістник НТУУ «КПІ». Радіотехніка, радіо апаратобудування», №92, 2023.*
<https://doi.org/10.20535/RADAR.2023.92>

UDC 620.179.16, 004.89

THE IMPORTANCE OF ENSURING THE INTERPRETABILITY OF CLASSIFICATION RESULTS USING NEURAL NETWORKS IN MEDICINE

Galagan R.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
E-mail: r.galagan@kpi.ua

Artificial intelligence (AI) technologies based on deep neural networks (NNs) are being rapidly and widely implemented in various industries, households, and medicine. Their capabilities open up new horizons in data processing, analysis, and interpretation of the results. For example, NNs can be used to detect defects in concrete structures [1], perform surface image segmentation of various structural elements to detect defects [2], automatically detect objects on thermograms in the field of safety control [3], etc.

However, the medical industry and the introduction of AI in it to diagnose various diseases deserves special attention [4]. Although deep NNs have proven themselves in classification and detection tasks, their implementation in the medical field is limited by a number of hindrances from the point of view of medical professionals. Consider this on the example of using NNs to analyze ultrasound images of various human organs in order to detect diseases. In this case, the limitations are as follows:

1. In any case, the final diagnosis should be made by a doctor, not by NN. Therefore, the question may arise: why use NN?
2. It is necessary to be able to analyze the work of NNs and work with specific software, which requires additional skills for medical professionals.
3. Due to the lack of understanding of how the NN detects diseases based on the analysis of images, distrust in the results of NN work may be formed.

Undoubtedly, the first hindrance will remain unchanged for a long period of time. The second hindrance can be overcome through training and professional development. And to overcome the third hindrance, we can suggest using methods of visualizing the decisions made by the NN. In particular, the most well-known methods are Gradient-weighted Class Activation Maps (Grad-CAM) and Local Interpretable Model-agnostic Explanations (LIME).

Grad-CAM is a visualization method used in image classification tasks to explain and interpret the results of deep convolutional NNs [5]. This method visualizes the

predictions made by a convolutional NN based on the information obtained from the NN itself. This allows us to understand which parts of the input image have the greatest impact on the classification decision.

LIME is also one of the methods for interpreting activation layers of convolutional NNs [6]. The basic idea behind LIME is to explain the model's predictions by creating a local model that will interpret the solutions in a small neighborhood of the interested object or some region of the image. LIME uses a method of generating artificial data around the interested object and applies this data to the model to get an explanation for classification or segmentation.

Due to the implementation of these methods, the medical professional will not only receive the NN's response based on the results of the ultrasound image analysis, but will also be able to see and understand why the NN made this decision. For example, Fig. 1 shows an ultrasound image with contours highlighting the areas that most influenced the model's decision about the presence of polycystic disease (the contours themselves were obtained by applying the Grad-CAM method).

This approach will ensure the interpretability of classification or detection results and will provide a more compelling reason to trust the decisions of the NN or, conversely, to reject them if they are false. In this case, the NN will not seem like a "black box" that makes decisions in an unclear way. Then it will be easier for a medical professional to accept new technologies and support their implementation.

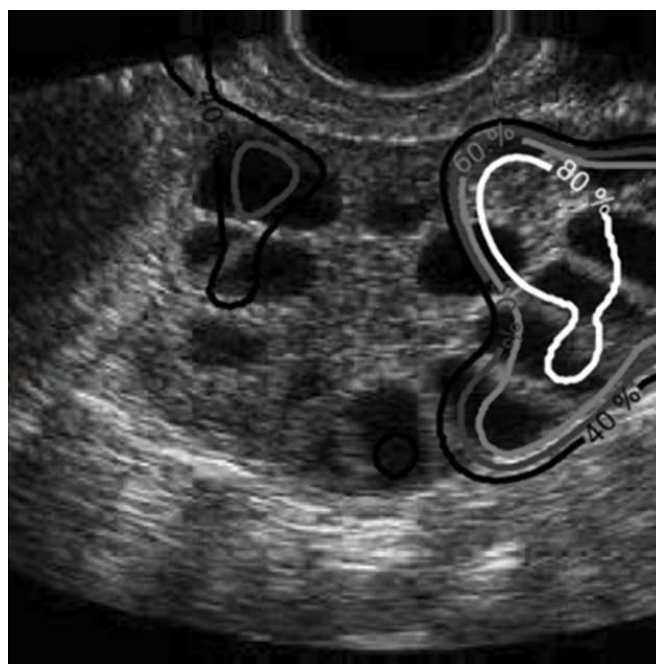


Fig. 1. Ultrasound image with contours that were obtained with Grad-CAM

Keywords: ultrasound diagnostics, medicine, neural network, Grad-CAM, LIME.

References

- [1] Р. М. Галаган, С. М. Андреев, В. Ф. Петрик, В. Г. Баженов, Ю. Ю. Лисенко, “Виявлення дефектів бетонних конструкцій на основі аналізу зображень за допомогою згорткових

нейронних мереж”, *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, Том 34 (73), № 2, с. 1-7, 2023.

- [2] Y. V. Steshenko, A. S. Momot, A. G. Protasov, O. V. Muraviov, “Automation of the process of segmentation of images of metal surface defects using the neural network U-Net”, *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, №2, pp. 34-40, 2023.
- [3] I. O. Skladchykov, A. S. Momot, R. M. Galagan, H. A. Bohdan, K. M. Trotsiuk, “Application of YOLOX deep learning model for automated object detection on thermograms”, *Information Extraction and Processing*, 50(126), p. 69-77, 2022.
- [4] A. Momot, R. Galagan, M. Zaboluiieva, “Automation of ultrasound breast cancer images classification using deep neural networks”, *Sciences of Europe*, no. 96, pp. 38–41, 2022.
- [5] D. Reiff, Understand your Algorithm with Grad-CAM. [Online]. Available: <https://towardsdatascience.com/understand-your-algorithm-with-grad-cam-d3b62fce353>. [Accessed Apr. 10, 2024].
- [6] Ribeiro, Marco Tulio, Sameer Singh, and Carlos Guestrin. "Why should i trust you?" Explaining the predictions of any classifier", in *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining*, p. 1135-1144, 2016.