

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, м. Київ:

Л.М. ЛОБАНОВ (головний редактор),

В.О. Троїцький (заст. гол. ред.),

Є.О. Давидов, О.С. Міленін, С.А. Недосєка,

Ю.М. Посипайко,

І.Ю. Романова (відповід. секретар);

К. Драган

Технологічний інститут повітряних сил,

Варшава, Польща;

Я. Грум

Люблянський університет, Словенія;

М.Л. Казакевич

ІФХ ім. Л.В. Писаржевського НАН України, м. Київ;

О.М. Карпаш, П.М. Райтер

ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ;

Й. Мірчев

Інститут механіки, Софія, Болгарія;

Л.І. Муравський, З.Т. Назарчук,

В.М. Учанін (заст. гол. ред.)

ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів;

В.С. Єременко, Ю.В. Куц, А.Г. Протасов

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ;

А. Савін

Національний інститут досліджень та розробок з

технічної фізики, Ясси, Румунія;

В.О. Стороженко

ХНУ радіоелектроніки, м. Харків;

Г.М. Сучков

НУ «ХП», м. Харків;

М.Г. Чаусов

НУ біоресурсів і природокористування України, м. Київ.

Виконавчий редактор – О.Т. Зельніченко,

Міжнародна Асоціація «Зварювання», м. Київ

Видавець

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Адреса редакції

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, Україна, м. Київ,

вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: +38 (044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk

Журнал входить до переліку затверджених МОН

України видань для публікації праць здобувачів

наукових ступенів за спеціальностями 132, 151, 152.

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Рекомендовано до друку редакційною колегією журналу.

ISSN 0235-3474, Doi.org/10.37434/tdnk

Журнал зареєстровано Національною радою України з

питань телебачення і радіомовлення 09.05.2024,

ідентифікатор медіа R30-04568.

Передплата 2024

Передплатний індекс 74475. 4 випуски на рік (видається

щоквартально). Друкована версія/електронна версія:

1200 грн. за річний комплект.

За зміст рекламних матеріалів видавець журналу

відповідальності не несе.

ЗМІСТ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

ЯВОРСЬКИЙ І.М., ЮЗЕФОВИЧ Р.М., ЛИЧАК О.В., КОМАР-
НИЦЬКИЙ Б.Р., ХМІЛЬ Р.І., СМІРНОВА О.Я. Дослідження
кореляційної структури вібраційного сигналу підшипни-
кових вузлів декантера 3

ВОРОНА Г.В., КОСТЕНЕВИЧ О.С., МІЛЕНІН О.С.,
МАХНЕНКО О.В. Підсилення ділянки трубопроводу АЕС з
дефектом стоншення стінки при встановленні зварної латки... 11

МОМОТ А.С., КРЕЦУЛ В.В., МУРАВЬОВ О.В., ГАЛАГАН Р.М.
Автоматизоване детектування дефектів друкованих плат
на основі нейронної мережі YOLOV5..... 17

НОВОДРАНОВ А.С. Методи розпізнавання поверхневих
дефектів на тонколистових матеріалах для автоматизації
візуального контролю (Огляд) 25

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

УЧАНІН В.М., НАРДОНІ Д., НАРДОНІ П. Виявлення втомних
тріщин у зоні галтельних переходів сталевих лопаток
промислових газових турбін вихрострумовим методом 34

ТОРОП В.М. Практика впровадження методології ризик-
аналізу експлуатації зварних металоконструкцій в Україні 41

ІНФОРМАЦІЯ

Програми професійної підготовки на 2024 р 47

Український дефектоскоп контролює залізничні рейки
в Туреччині..... 48

Галузева конференція з неруйнівного контролю в авіації 49

Новини Українського товариства неруйнівного контролю
та технічної діагностики 51

Видання журналу підтримують:

Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики,
Технічний комітет стандартизації «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» ТК-78,
Асоціація «ОКО», ТОВ «НВФ «Діагностичні прилади»

EDITORIAL BOARD

Scientists of E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU, Kyiv:

L.M. LOBANOV (Editor-in-Chief),

V.O. Troitskyi (Deputy Editor-in-Chief),

Ie.O. Davydov, O.S. Milenin, S.A. Nedoseka, Yu.M. Posypaiko, I.Yu. Romanova (execut. secretary);

Krzysztof Dragan,

Air Force Institute of Technology, Warsaw, Poland;

Janez Grum,

University of Ljubljana, Slovenia;

M.L. Kazakevich,

L.V. Pisarzhevskii Institute of Physical Chemistry of NAS of Ukraine, Kyiv;

O.M. Karpash, P.M. Raiter,

Ivano-Frankivsk NTU of Oil and Gas, Ukraine;

Yordan Mirchev

Institute of Mechanics, Sofia, Bulgaria;

L.I. Muravsky, Z.Th. Nazarchuk,

V.M. Uchanin (Deputy Editor-in-Chief)

Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv;

V.S. Eremenko, Yu.V. Kuts, A.G. Protasov

NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine; Adriana Savin

National Institute of R&D for Technical Physics, Iasi, Romania; V.O. Storozhenko

Kharkiv NU of Radio Electronics, Ukraine;

H.M. Suchkov

NTU «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine;

M.G. Chausov

NU of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv.

Executive Editor – O.T. Zelnichenko,

International Association «Welding», Kyiv, Ukraine

Publisher

International Association «Welding»

Address of Editorial Office

E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine

03150, Ukraine, Kyiv, 11 Kazymyr Malevych Str.

Tel./fax: +38 (044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tdnk

The Journal is included in the list of publications approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine for the publication of works of applicants for academic degrees in specialties 132, 151, 152.

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Recommended for printing Editorial Board of the Journal.

ISSN 0235-3474, Doi.org/10.37434/tdnk

The Journal was registered by the National Council of

Ukraine on Television and Radio Broadcasting on

09.05.2024, carrier identifier R30-04568.

Subscription 2024

Subscription index 74475.

4 issues per year (issued quarterly), back issues available.

\$128, subscriptions for the printed (hard copy) version, air postage and packaging included.

\$104, subscriptions for the electronic version.

Publisher is not responsible for the content of the promotional material.

CONTENT

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

- JAVORSKYJ I.M., YUZEFOVYCH R.M., LYCHAK O.V., KOMARNYTSKYI B.R., KHMIL R.I., SMIRNOVA O.Y. Investigation of the correlation structure of the vibration signal of the decanter bearing assembly..... 3
- VORONA G.V., KOSTENEVYCH O.S., MILENIN O.S., MAKHNENKO O.V. Reinforcement of an NPP pipeline with a wall thinning defect by applying external weld overlay..... 11
- MOMOT A.S., KRETSUL V.V., MURAVIOV O.V., GALAGAN R.M. Automated defect detection in printed circuit boards based on the YOLOV5 neural network..... 17
- NOVODRANOV A.S. Methods for detecting surface defects on thin sheet materials for visual control automation (Review)..... 25

INDUSTRIAL

- UCHANIN V.M., NARDONI D., NARDONI P. Detection of fatigue cracks in the fillet zone of steel blades of industrial gas turbines using eddy current method..... 34
- TOROP V.M. Practice of implementing the methodology of risk analysis of the operation of welded metal structures in Ukraine 41

INFORMATION

- Vocational training programs for 2024 47
- The Ukrainian flaw detector monitors railway rails in Turkey 48
- Industry conference on non-destructive testing in aviation 49
- News of the Ukrainian society for non-destructive testing 51

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic, Technical Committee on standardization «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» TC-78, Association «OKO», LLC «Diagnostic devices»

ДОСЛІДЖЕННЯ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ СТРУКТУРИ ВІБРАЦІЙНОГО СИГНАЛУ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ ДЕКАНТЕРА

І.М. Яворський^{1,2}, Р.М. Юзефович^{1,3}, О.В. Личак¹, Б.Р. Комарницький¹, Р.І. Хміль³, О.Я. Смірнова³

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.

E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com

²Бидгощська Політехніка. 85796, Польща, м. Бидгощ, алея проф. С. Каліського, 7

³Національний університет «Львівська політехніка». 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12

З використанням теорії та методів статистики періодично нестационарних випадкових процесів проаналізовано кореляційну структуру вібраційного сигналу підшипникового вузла декантера. Побудовано індикатори для виявлення та оцінювання розвитку дефектів. Досліджено зв'язок між шириною смуги фільтрації та параметрами амплітудного спектру дисперсії сигналу. Бібліогр. 21, табл. 3, рис. 10.

Ключові слова: декантер, вібрація, пробний період, кореляційна функція, спектральна густина, смугова фільтрація, індикатор розвитку дефекту

Вступ. На даний час існує ряд методів отримання інформації про технічний стан механізмів обертової дії, які спрямовані на виявлення дефектів як у процесі виготовлення, монтування та експлуатації, так і на ранніх стадіях їх розвитку. Вважається, що носієм інформації про технічний стан у системах вібродіагностики є вібраційний сигнал (віброприскорення, віброшвидкість, вібропереміщення), що збуджується в результаті механічної взаємодії деталей механізмів (наприклад, тіла кочення та сепаратора в підшипниках, пари коліс у редукторі, циліндра та поршня у двигунах внутрішнього згорання, зубчасті передачі тощо). Слід зазначити, що характер такої взаємодії знаходить своє відображення у властивостях відібраних сигналів. Для опису та аналізу закономірностей структури відібраних вібраційних сигналів необхідно вміти вибрати та обґрунтувати адекватні математичні моделі сигналів, методи та алгоритми їх обробки, застосувати процеси виділення діагностичних ознак і тоді на їх основі прийняти рішення про технічний стан механізму [1–11]. Вібрацію, що виникає в елементах досліджуваних механізмів, можна розглядати як вимушені коливання цілого механізму відносно положення рівноваги. У перших дослідженнях вібрацій виходять з припущення, що для їх опису можна застосовувати детерміновані моделі у вигляді періодичних або майже періодичних функцій. Тоді інформативними параметрами сигналу вібрації є періоди, амплітуди та фази гармонічних складових функцій, що описують коливання. Оцінки амплітуд вимушених коливань, зумовлених обертанням, дають змогу виявити значні зміни характеристик технічного

стану механізмів, які граничать з аварійною ситуацією в процесі експлуатації машини [1, 3, 12–15].

Імовірнісні підходи до задачі аналізу стохастичних складових сигналів вібрацій у вигляді стаціонарних випадкових процесів використовують для формування діагностичних ознак усереднених в часі (постійних) характеристик. До них слід віднести оцінки кореляційної функції і спектральної густини потужності, оцінку дисперсії. Інформацію про локальні дефекти, які зароджуються, може бути отримано при аналізі параметрів стохастичної амплітудно-фазової модуляції, оскільки розвиток таких дефектів викликає у вібраційному процесі ріст числа й амплітуд короткотривалих імпульсів, які модулюють амплітуду й фазу вимушених і власних коливань механічної системи [16–20]. Зокрема, локальні дефекти у вигляді задирих, спричиняючи заїдання, схоплення контактуючих поверхонь, модулюють фазу вимушених коливань, а дефекти типу тріщин, викришування, корозії або ерозії поверхонь, модулюють амплітуду вимушених коливань. Властивості такої модуляції описуються моделями у вигляді періодично нестационарних випадкових процесів (ПНВП) [1–3, 9].

Мета роботи: проведення на основі ПНВП-підходу аналізу кореляційної структури вібраційного сигналу, яка формується модуляційними процесами, побудова відповідних індикаторів і дослідження впливу ширини смуги фільтрації сигналу на їх величину.

ПКВП-аналіз вібрацій. Для аналізу був вибраний вібраційний сигнал підшипникового вузла декантера Flottweg 24E з метою встановлення його технічного стану. Сигнали вібрації реестру-

Яворський І.М. – <https://orcid.org/0000-0003-0243-6652>, Юзефович Р.М. – <https://orcid.org/0000-0001-5546-453X>,

Личак О.В. – <https://orcid.org/0000-0001-5559-1969>, Комарницький Б.Р. – <http://orcid.org/0009-0009-9595-8580>,

Хміль Р.І. – <https://orcid.org/0009-0003-1855-6226>, Смірнова О.Я. – <https://orcid.org/0000-0002-1314-0489>

© І.М. Яворський, Р.М. Юзефович, О.В. Личак, Б.Р. Комарницький, Р.І. Хміль, О.Я. Смірнова, 2024

валися у вертикальному напрямі давачами віброприскорення, які кріпилися на обіймах опорних підшипників. Параметри відбору сигналів наступні: нижня частота зрізу смугового фільтра становила 2 Гц, верхня – 5 кГц, частота дискретизації сигналу 10 кГц, тривалість реєстрації – 10 с. Фрагмент реалізації вібраційного сигналу показано на рис. 1.

Для загального дослідження властивостей сигналу спершу розраховувалися оцінки його кореляційної функції та спектральної густини у стаціонарному наближенні:

$$\hat{R}(jh) = \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{K-1} [\xi(nh) - \hat{m}] [\xi((n+j)h) - \hat{m}],$$

$$\hat{m} = \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{K-1} \xi(nh), \quad (1)$$

$$\hat{f}(\omega) = \frac{h}{2\pi} \sum_{n=-L}^L k(nh) \hat{R}(nh) \cos \omega nh, \quad (2)$$

де $h = \frac{T}{K}$ – інтервал дискретизації; j – номер зсуву; T – тривалість реалізації у часі; K – кількість відліків реалізації; $L = u_m/h$, де u_m – точка усічення корелограму, $k(nh)$ – кореляційне вікно Хеммінга.

Графіки отриманих оцінок кореляційної функції (1) і спектральної густини (2) показані на рис. 2. Наявність періодичного «хвоста» в оцінці кореляційної функції (рис. 2, а) спричиняє появу у оцінці спектральної густини (рис. 2, б) дискретних компонент, які представлені гострими піками на певних частотах. Ці піки також можуть бути наслідком вузькосмугових стохастичних модуляцій несучих гармонік. Такий «змішаний» спектр є складним для інтерпретації і кількісного аналізу, тому доцільно провести розділення дискретної і неперервної складових сигналу та окремий спеціальний аналіз відповідними методами [1, 20, 21]. Ця процедура є важливою з точки зору діагностування механізму, оскільки дискретні та неперервні складові діагностичного сигналу можуть бути спричинені різними дефектами.

Для отримання оцінки періоду математичного сподівання, що описує регулярну складову сигналу, використано функціонал виду [1, 20, 21]:

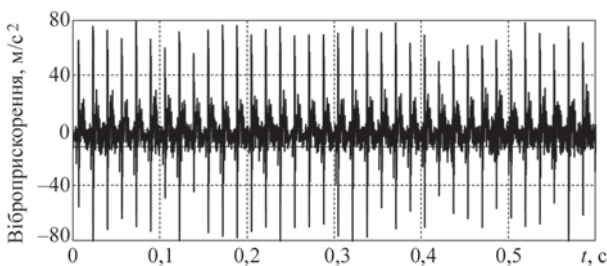


Рис. 1. Фрагмент реалізації сигналу вібрації підшипника декантера

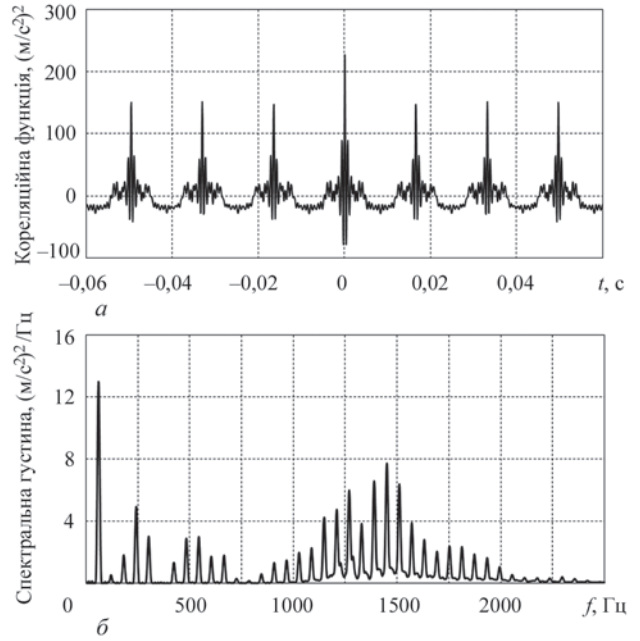


Рис. 2. Оцінки кореляційної функції (а) і функції спектральної густини (б) для стаціонарного наближення моделі сигналу

$$\hat{F}_1(\theta) = \frac{1}{2K+1} \sum_{n=-K}^K \hat{m}^2(\theta, nh), \quad (3)$$

де $\hat{m}(\theta, nh) = \sum_{k=1}^L \left[\hat{m}_k^c(\theta) \cos k \frac{2\pi}{\theta} nh + \hat{m}_k^s(\theta) \sin k \frac{2\pi}{\theta} nh \right], \quad (4)$

$$\left\{ \begin{matrix} \hat{m}_k^c(\theta) \\ \hat{m}_k^s(\theta) \end{matrix} \right\} = \frac{2}{2K+1} \sum_{n=-K}^K \xi(nh) \left\{ \begin{matrix} \cos k \frac{2\pi}{\theta} nh \\ \sin k \frac{2\pi}{\theta} nh \end{matrix} \right\}, \quad (5)$$

а θ – пробний період. Похибок отриманої оцінки, викликаних ефектами накладання частот першого та другого роду, можна уникнути, якщо величина кроку дискретизації сигналу h у рівняннях (4) і (5) вибрана таким чином, що задовольняє нерівності [1, 20, 21]:

$$h \leq \frac{P}{2L_1+1}, \quad h \leq \frac{P}{2L_2+1},$$

де P – період нестаціонарності, а L_1 і L_2 – число гармонік математичного сподівання та кореляційної функції відповідно. При цьому слід зазначити, що величина пробного періоду θ у рівняннях (4) і (5) може задаватися довільною та не залежить від величини кроку дискретизації h .

Графік залежності квадратичного функціоналу у рівнянні (3) від пробної частоти $f = 1/\theta$ (для $L_1 = 40$ і $T = 10$ с) наведено на рис. 3.

Положення точки максимуму функціоналу відповідає оцінці базової частоти $\hat{f}_0 = \frac{1}{\hat{P}}$. Знайдена величина оцінки базової частоти (у межах трьох десяткових знаків) дорівнює $\hat{f}_0 = 60,430$ Гц. Зна-

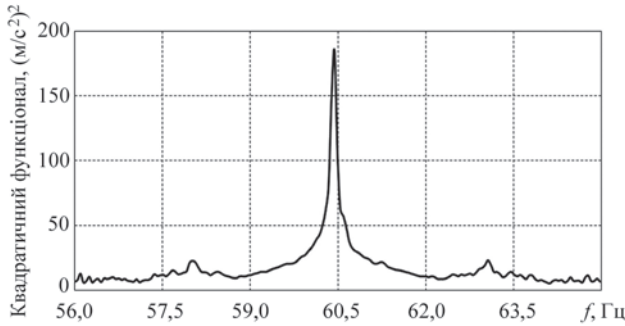


Рис. 3. Залежність квадратичного функціоналу (3) від пробної частоти

ючи її, можна отримати оцінки синусних і косинусних складових амплітуд у рівнянні (5) і величини самих амплітуд:

$$\hat{A}(kf_0) = \sqrt{[\hat{m}_k^c(\hat{P})]^2 + [\hat{m}_k^s(\hat{P})]^2}.$$

Отриманий амплітудний спектр $\{\hat{A}(kf_0), k=1, 40\}$ представлено на рис. 4 у вигляді діаграми. Як видно з рис. 4, цей спектр є досить широкий та містить принаймні 40 значущих гармонік, що перекривають смугу приблизно 2,5 кГц.

Логічно припустити, що амплітуди деяких гармонік зростають у міру розвитку несправності. Отже, для попередньої кількісної оцінки стану механізму можна використовувати суму амплітуд гармонік:

$$\hat{A}_\Sigma = \sum_{k=1}^{L_1} \hat{A}\left(k \frac{2\pi}{\hat{P}}\right)$$

або суму потужностей гармонік:

$$\hat{Q}_d = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{L_1} \hat{A}^2\left(k \frac{2\pi}{\hat{P}}\right).$$

При цьому динаміку розвитку несправності можна оцінити за допомогою показників, що визначаються співвідношеннями поточних (с) величин до початкових (і):

$$I_1 = \frac{\hat{A}_\Sigma^{(c)}}{\hat{A}_\Sigma^{(i)}}, \quad I_2 = \frac{\hat{Q}_d^{(c)}}{\hat{Q}_d^{(i)}}.$$

Ці індикатори характеризують регулярну складову і можуть бути використані для виявлення

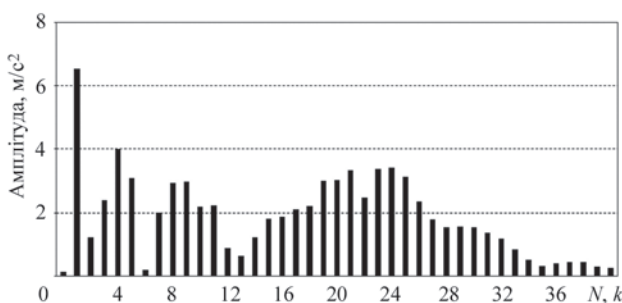


Рис. 4. Амплітудний спектр регулярної складової

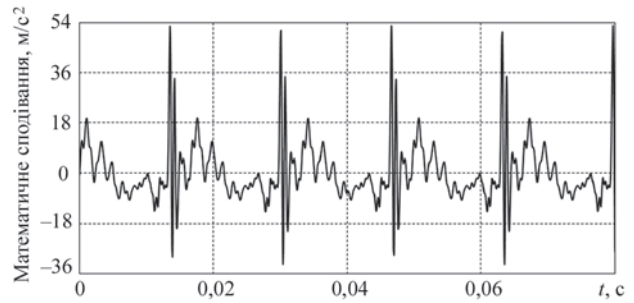


Рис. 5. Регулярна складова вібраційного сигналу

та оцінювання розвинутого дефекту. Таке оцінювання дає змогу лише встановити придатність діагностованого механізму до експлуатації. Дослідження ранніх стадій зародження та розвитку дефекту потребують глибшого аналізу структури стохастичної складової діагностичного сигналу.

Отримавши з використанням формул (5) синусні та косинусні коефіцієнти Фур'є, можна обчислити регулярну складову для всіх $t \in [0, \hat{P}]$ на основі інтерполяційної формули [1, 20, 21]:

$$\hat{m}_\xi(t, \hat{P}) = \hat{m}_0 + \sum_{k=1}^{L_1} \left[\hat{m}_k^c(\hat{P}) \cos k \frac{2\pi}{\hat{P}} t + \hat{m}_k^s(\hat{P}) \sin k \frac{2\pi}{\hat{P}} t \right].$$

Графік регулярної складової наведено на рис. 5.

Оцінка кореляційної функції стохастичної складової сигналу, отриманої шляхом віднімання регулярної складової від вібраційного сигналу, має вигляд повільно зникаючих груп коливань, що слідують одна за одною з періодом основної частоти (рис. 6, а). Кореляційна функція зникає до малих величин при зростанні зсуву, отже, регулярна складова сигналу була повністю вилучена. Основна частина оцінки спектральної густини стохастичної складової зосереджена у діапазоні [800, 2500 Гц] (рис. 6, б). Вона має гребінчасту структуру, причому різниці між положенням піків приблизно відповідають величині основної частоти.

Для виявлення прихованої періодичності другого порядку використаємо квадратичний функціонал [48–52]:

$$\hat{F}_2(0, \theta) = \frac{1}{2K+1} \sum_{n=-K}^K \hat{R}_\xi^2(nh, 0, \theta), \quad (6)$$

$$\text{де } \hat{R}_\xi^2(nh, 0, \theta) = \sum_{k=1}^{L_2} \left[\hat{C}_k^{(\xi)}(jh, \theta) \cos k \frac{2\pi}{\theta} nh + \hat{S}_k^{(\xi)}(jh, \theta) \sin k \frac{2\pi}{\theta} nh \right]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{C}_k^{(\xi)}(jh, \theta) \\ \hat{S}_k^{(\xi)}(jh, \theta) \end{array} \right\} = \frac{2}{2K+1} \sum_{n=-K}^K \left[\xi(nh) - \hat{m}(nh) \right] \times$$

$$\times \left[\xi((n+j)h) - \hat{m}((n+j)h) \right] \left\{ \begin{array}{l} \cos k \frac{2\pi}{\theta} nh \\ \sin k \frac{2\pi}{\theta} nh \end{array} \right\}. \quad (7)$$

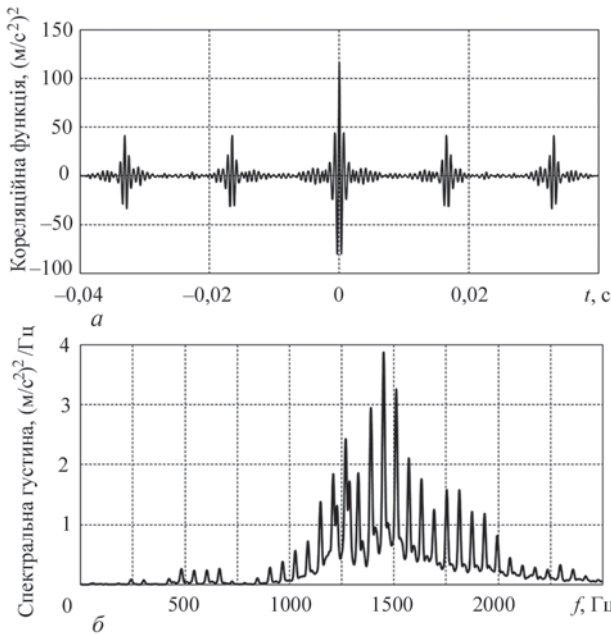


Рис. 6. Кореляційна функція (а) і спектральна густина потужності (б) стохастичної складової сигналу

Оцінки періоду дисперсії знаходяться як значення θ , яке відповідає максимуму статистики (6). Ефекти накладання частот першого та другого роду можна уникнути, якщо величина періоду дискретизації задовольняє нерівності [1, 20, 21]:

$$h \leq \frac{P}{4L_2 + 1}. \quad (8)$$

Величина, отримана з рівняння (8) в точці $\theta = \hat{P}$, є близькою до усередненої в часі величини $\hat{R}_\xi^2(nh, 0, \hat{P})$:

$$\hat{F}_2(0, \hat{P}) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{L_2} \left[\left[\hat{C}_k^{(\xi)}(0, \hat{P}) \right]^2 + \left[\hat{S}_k^{(\xi)}(0, \hat{P}) \right]^2 \right].$$

Ця величина визначає сумарну потужність гармонік дисперсії. Для розрахунку оцінки дисперсії використано статистику:

$$\hat{b}_\xi(t, 0, \hat{P}) = \hat{B}_0^{(\xi)}(0) + \sum_{k=1}^{L_2} \left[\hat{C}_k^{(\xi)}(0, \hat{P}) \cos k \frac{2\pi}{\hat{P}} t + \hat{S}_k^{(\xi)}(0, \hat{P}) \sin k \frac{2\pi}{\hat{P}} t \right] \quad (9)$$

де $\hat{B}_0^{(\xi)}(0) = \frac{1}{2K+1} \sum_{n=-K}^K [\xi(nh) - \hat{m}(nh)]^2. \quad (10)$

Якщо величина періоду дискретизації задовольняє умові нерівності (8), то рівняння (10) є інтерполяційною формулою, що дозволяє розрахувати величини дисперсії для всіх $t \in [0, \hat{P}]$ [1, 20, 21].

Графік залежності функціоналу (6) від пробної частоти $f = 1/\theta$, розрахований для $L_2 = 40$, наведено на рис. 7. Координата точки максимуму, тобто величина оцінки базової частоти, дорівнює

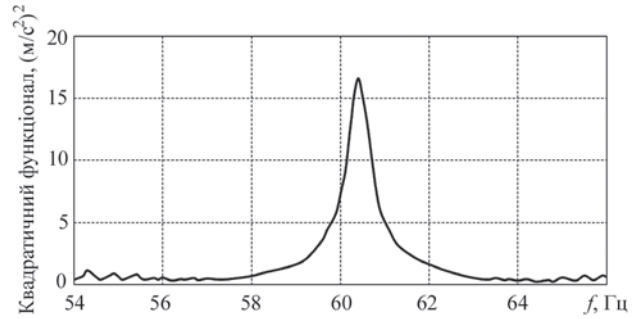


Рис. 7. Залежність квадратичного функціоналу дисперсії (6) від пробної частоти

$\hat{f}_0 = 60,420$ Гц. Амплітудний спектр дисперсії, розрахований як:

$$\hat{V}(kf_0) = \sqrt{\left[\hat{C}_k^{(\xi)}(0, \hat{P}) \right]^2 + \left[\hat{S}_k^{(\xi)}(0, \hat{P}) \right]^2}$$

наведено на рис. 8, б. Ширина спектру дисперсії є суттєво меншою за спектр регулярних коливань. Приблизно 25–27 гармонік у ньому мають значущі величини, оскільки величини амплітуд $\hat{V}(kf_0)$ визначаються кореляціями лише тих гармонік спектру, які зсунуті на $k\hat{f}_0$ [1, 20, 21]. Часова залежність оцінки дисперсії, отримана з рівняння (9), представлена на рис. 8, а. Вона має вигляд послідовності коротких потужних імпульсів, що слідує один за одним з періодом обертання механізму. Такі виявлені властивості часової залежності дисперсії та її амплітудного спектру свідчать про наявність суттєвого пошкодження в діагностованому механізмі.

Як впливає з практичних досліджень [10–18, 28], вібраційний сигнал, який генерує механізм, набуває властивостей періодичної нестационар-

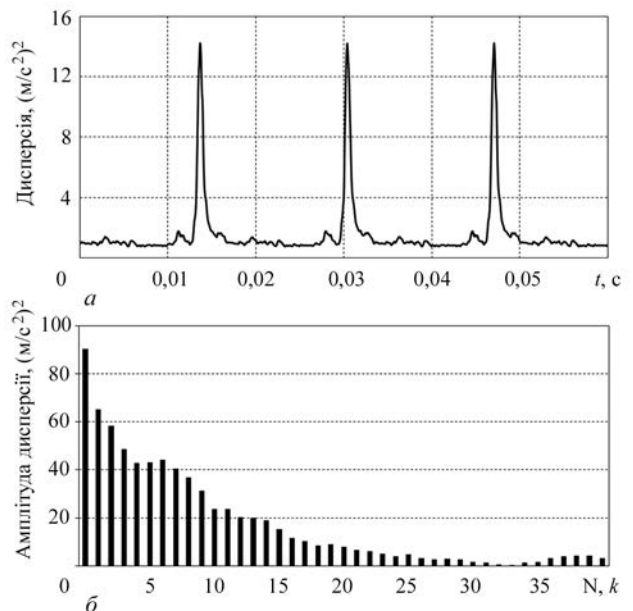


Рис. 8. Оцінка дисперсії стохастичної складової (а) та її амплітудний спектр (б)

ності другого порядку у зв'язку з розвитком дефекту (виникненням несправності). Це означає, що часові варіації дисперсії та оцінки кореляційної функції є індикаторною ознакою пошкодження системи. Таким чином, показники, сформовані на основі кореляційних компонентів, чутливі до появи та розвитку дефекту. Такий показник визначається відношенням сумарної амплітуди дисперсійної гармоніки та нульової кореляційної складової, тобто «індикатора нестационарності» вібраційного сигналу:

$$I_3 = \frac{\sum_{k=1}^{L_2} \hat{V} \left(k \frac{2\pi}{\hat{P}_1} \right)}{\hat{B}_0(0)}$$

Зростання показника I_3 є свідченням розвитку дефекту і, відповідно, погіршенням стану діагностованої системи.

Стохастичний сигнал можна представити як суперпозицію гармонік несучої з високочастотною вузькосмуговою модуляцією:

$$\xi(t) = \sum_{k=-L}^L \left[\mu_k^c(t) \cos(\lambda_0 + k\omega_0)t + \mu_k^s(t) \sin(\lambda_0 + k\omega_0)t \right]. \quad (11)$$

де L – число вибраних для аналізу частотних смуг високо частотного сигналу шириною ω_0 , λ_0 – резонансна частота механізму, а $\mu_k^c(t)$ і $\mu_k^s(t)$ – модулюючі випадкові процеси.

Кореляційна функція сигналу (11) визначається формулою:

$$b_\xi(t, u) = \sum_{l=-L}^L \left[R_{\mu_l}^c(u) \cos(\lambda_0 + l\omega_0)u + R_{\mu_l}^{cs}(u) \sin(\lambda_0 + l\omega_0)u \right] + \sum_{\substack{r=-2L \\ r \neq 0}}^{2L} \sum_{l \in S} \left[R_{\mu_{l-r}, \mu_l}^c(u) \cos[r\omega_0 t + (\lambda_0 + l\omega_0)u] + R_{\mu_{l-r}, \mu_l}^{cs}(u) \sin[r\omega_0 t + (\lambda_0 - l\omega_0)u] \right]. \quad (12)$$

Властивості високо частотної модуляції можуть бути проаналізовані шляхом використання вузькосмугової фільтрації сигналу з наступним перетворенням Гільберта відфільтрованих складових.

Використовуючи смугову фільтрацію виділимо сигнал, спектральна густина якого обмежена смугою [850, 2030 Гц] з центральною частотою $\lambda_0 = 1453$ Гц. Ця смуга містить дев'ятнадцять високо частотних компонент (центральна та по дев'ять ліворуч і праворуч від центральної). Вона перекриває майже всю частотну область стохастичної складової сигналу. Сформована карта кореляцій $|R_{kl}^{(\mu)}(0)|$ для $k, l = \overline{-9, 9}$ [24] зображена на рис. 9.

Елементи $|R_{kl}^{(\mu)}(0)|$ бокових діагоналей з номерами $r = |k - l|$ визначаються взаємними кореляціями компонент, несучі частоти яких зсунуті на $r\hat{f}_0$. Подвоєна сума елементів головної діагоналі

$$\hat{S}_0 = 2 \sum_{k=-9}^9 |R_{kl}^{(\mu)}(0)|,$$

дорівнює загальній потужності модуляційних процесів.

Подвоєна сума елементів r -ї діагоналі

$$S_r = 2 \left[\sum_{l=r-9}^9 |\hat{R}_{l-r, l}^{(\mu)}(0)| + \sum_{l=-9}^{9-r} |\hat{R}_{l+r, l}^{(\mu)}(0)| \right]$$

визначає амплітуду r -ї гармоніки дисперсії дев'ятнадцятикомпонентного ПНВС. Теоретичні амплітуди гармонік визначаються з формули (12) при $u = 0$.

Аналізуючи відповідну карту кореляцій (рис. 9), можна зробити висновок, що найбільш корельовані компоненти зосереджені навколо головної діагоналі та осей системи координат карти кореляцій, де величини взаємних кореляцій близьких гармонік є домінуючими. Величини взаємних кореляцій зменшуються зі зростанням різниці частот між гармоніками і вони найменші для компонент, які лежать на протилежних краях смуги стохастичної складової сигналу.

Для дослідження зв'язку між шириною смуги фільтрації і амплітудним спектром дисперсії розглянуто декілька варіантів фільтрації. При дослідженні було зазначено, що величини амплітуд гармонік, які були розраховані прямо на основі реалізації з використанням (7) і подвоєної суми елементів відповідних діагоналей матриці кореляцій, несуттєво відрізняються. Це не суперечить

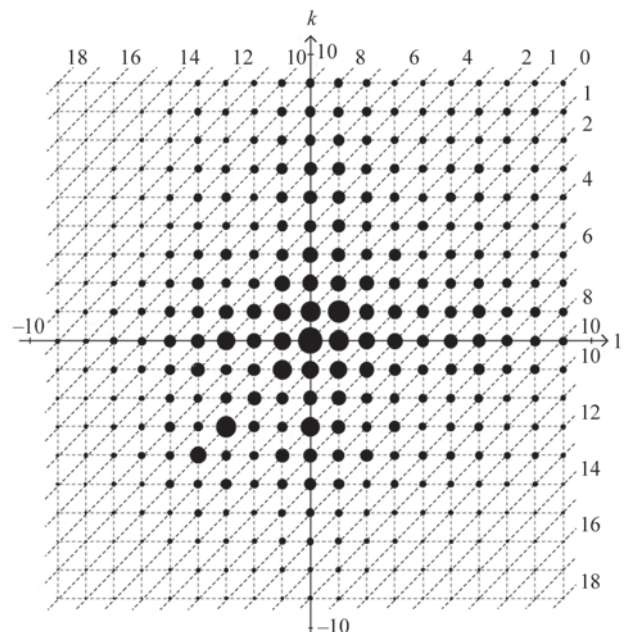


Рис. 9. Карта кореляцій $|R_{kl}^{(\mu)}(0)|$ для $k, l = \overline{-9, 9}$

Таблиця 1. Величини амплітуд $\hat{V}(rf_0)$ і відповідних сум \hat{S}_r діагональних елементів

r	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
\hat{S}_r	78,30	112,48	102,40	100,30	77,43	62,88	49,84	30,78	22,88	13,80	6,92
$\hat{V}(rf_0)$	78,28	110,80	100,64	98,58	76,32	62,64	49,24	30,54	22,34	13,66	7,00

теоретичному припущенню, що модулюючі вузькосмугові процеси є взаємостаціонарними. Перевірку цього припущення проведено шляхом аналізу одинадцятикомпонентного сигналу. Результати проведених розрахунків наведено у табл. 1. Видно що, отримані величини $\hat{V}(rf_0)$ та \hat{S}_r відрізняються несуттєво. Малі різниці між ними цілком можна пояснити похибками обчислень. Отже, можна подвоєну суму елементів r -ї діагоналі матриці замінити амплітудою r -ї гармоніки дисперсії.

Часова залежність дисперсії одинадцятикомпонентного ПНВС та його амплітудний спектр показано на рис. 10. Графік дисперсії (рис. 10, а) має форму послідовності різких високих піків. Розрахований показник нестационарності $I_3 = 3,648$. А сумарні взаємкореляції компонент, котрі власне визначають амплітуди гармонік стохастичної складової (рис. 10, б), наростають суттєво швидше, ніж їхня сумарна потужність.

При дослідженні кореляційної структури вібраційного сигналу слід порівнювати величини амплітуд $\hat{V}(rf_0)$ і відповідних сум \hat{S}_r діагональних елементів, які формують карту кореляцій $|R_{kl}^{(M)}(0)|$. Порівнювання змін цих величин потрібно проводити в залежності від ширини смуги сигналу.

Таблиця 2. Величини амплітуд гармонік дисперсії та індикаторів нестационарності для різної ширини смуг досліджуваного сигналу

Амплітуда	Ширина смуги (число гармонік)						
	$3\hat{f}_0$	$5\hat{f}_0$	$7\hat{f}_0$	$9\hat{f}_0$	$11\hat{f}_0$	$15\hat{f}_0$	$19\hat{f}_0$
S_0	30,00	42,95	57,75	69,69	78,30	90,08	97,92
S_1	34,22	59,51	80,38	96,97	112,48	136,40	152,05
S_2	15,19	43,78	66,19	83,68	102,40	128,78	145,80
S_3	–	27,16	58,18	82,74	100,19	126,11	144,44
S_4	–	9,74	33,34	56,18	77,43	104,69	123,52
S_5	–	–	17,79	39,09	62,88	94,98	114,56
S_6	–	–	10,17	29,14	49,54	85,25	106,82
S_7	–	–	–	15,50	30,78	64,80	88,95
S_8	–	–	–	7,44	22,82	51,88	78,52
S_9	–	–	–	–	13,80	38,28	64,03
S_{10}	–	–	–	–	7,32	28,25	48,82
S_{11}	–	–	–	–	–	20,68	38,47
S_{12}	–	–	–	–	–	12,94	29,52
S_{13}	–	–	–	–	–	7,23	12,84
S_{14}	–	–	–	–	–	3,09	15,35
S_{15}	–	–	–	–	–	–	10,14
S_{16}	–	–	–	–	–	–	6,40
S_{17}	–	–	–	–	–	–	3,42
S_{18}	–	–	–	–	–	–	1,28
I	0,83	1,63	2,30	2,95	3,70	5,01	6,11

налу. Величини амплітуд гармонік дисперсії для різної ширини смуги сигналу наведено в табл. 2. З цих даних видно, що амплітуди суттєво зростають

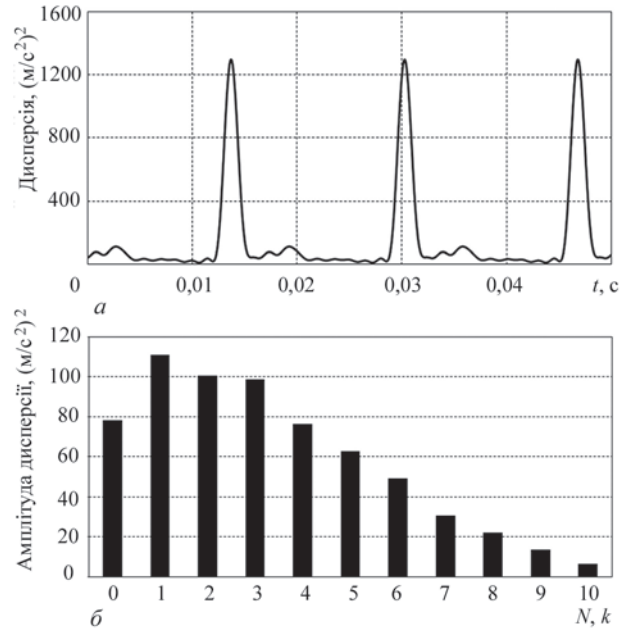


Рис. 10. Оцінка дисперсії одинадцятикомпонентного сигналу (а) та його амплітудний спектр (б)

Таблиця 3. Суми взаємкореляційних компонентів і величини їх потужності

Ширина смуги (число гармонік)	$3\hat{f}_0$	$5\hat{f}_0$	$7\hat{f}_0$	$9\hat{f}_0$	$11\hat{f}_0$	$15\hat{f}_0$	$19\hat{f}_0$
S_0	30,00	42,95	57,75	69,69	78,30	90,08	97,92
ΣS_r	49,80	140,02	266,04	411,17	579,42	902,60	1196,58

з ростом ширини смуги сигналу, причому величини деяких з них зростають більше ніж на порядок від початкового рівня. Величина показника нестационарності також зростає від 0,832 для трикомпонентного сигналу до 6,11 для дев'ятнадцятикомпонентного сигналу.

Сумарний приріст взаємкореляційних компонент суттєво перевищує сумарний приріст загальної потужності сигналу (табл. 3). Різниця між ними досягає максимуму при ширині смуги, що дорівнює $15\hat{f}_0$. Виходячи з цього, можна стверджувати, що для діагностування таких механізмів слід вибирати смугу сигналу рівною не менше ніж $15\hat{f}_0$.

Висновки

Результати проведеного дослідження показали, що використання смугової фільтрації перетворенням Гільберта дає змогу детально дослідити кореляційну структуру вібраційного сигналу високочастотної модуляції та описати специфічні особливості кожної окремої несправності на основі запропонованої кореляційної карти. При виборі смуги фільтрації досліджуваного сигналу слід проводити попередній кореляційний аналіз його структури. Використання запропонованих індикаторів, визначених на основі кореляційних компонентів, дозволить виявляти дефекти на ранніх стадіях і визначати ступінь їх розвитку.

Список літератури/References

1. Яворський І. (2013) *Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань*. Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів.
Javorskyj, I. (2013) *Mathematical models and analysis of stochastic oscillations*. PMI, Lviv [in Ukrainian].
2. Яворський І., Юзефович Р., Личак О. та ін. (2022) Застосування методів біперіодично корельованих випадкових процесів для дослідження вібраційних сигналів зубчастих передач. Частина 1. Теоретичні аспекти. *Техн. діагност. та неруйнів. контроль*, **4**, 4–11. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.04.01>
Javorskyj, I.M., Yuzefovych, R.M., Lychak, O.V., Slyepko, R.T., Varyvoda, M.Z., Semenov P.O. (2022) Diagnostics of gear pair damage using the methods of bi-periodically correlated random processes. Pt 1. Theoretical aspects of the problem. *Tech. Diagnost. ta Neruiviv. Kontrol*, **4**, 4–11. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.04.01> [in Ukrainian].
3. Юзефович Р., Яворський І., Личак О. та ін. (2023) Діагностика пошкоджень зубчастих пар методами біперіодично корельованих випадкових процесів. Частина 2. Дослідження вібраційних сигналів редуктора вітрогенератора. *Техн. діагност. та неруйнів. контроль*, **1**, 13–21. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.01.02>
Yuzefovych, R.M., Javorskyj, I.M., Lychak, O.V. et al. (2023) Diagnostics of gear pair damage using the methods of biperiodically correlated random processes. Part 2. Investigation of vibration signals of the wind power generator

- gearbox. *Tech. Diagnost. ta Neruiviv. Kontrol*, **1**, 13–21. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.01.02> [in Ukrainian].
4. Wang, D., Zhao, X., Kou, L.-L. et al. (2019) A simple and fast guideline for generating enhanced/squared envelope spectra from spectral coherence for bearing fault diagnosis. *Mech. Syst. Signal Process.*, **122**, 754–768. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.12.055>
5. Obuchowski, J., Wyłomańska, A., Zimroz, R. (2014) Selection of informative frequency band in local damage detection in rotating machinery. *Mech. Syst. Signal Process.*, **48**, 138–152. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.03.011>
6. Antoni, J. (2007) Cyclic spectral analysis in practice. *Mech. Syst. Signal Process.*, **21**(2), 597–630. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2006.08.007>
7. Ho, D., Randall, R.B. (2000) Optimization of bearing diagnostic techniques using simulated and actual bearing fault signals. *Mech. Syst. Signal Process.*, **14**, 763–788. DOI: <https://doi.org/10.1006/mssp.2000.1304>
8. Antoni, J., Borghesani, P. (2019) A statistical methodology for the design of condition indicators. *Mech. Syst. Signal Process.*, **114**, 290–327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.012>
9. Hurd, H.L., Miamee, A. (2007) *Periodically correlated random sequences: Spectral theory and practice*. Wiley, New York.
10. Antoni, J. (2009) Cyclostationarity by examples. *Mech. Syst. Signal Process.*, **23**(4), 987–1036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2008.10.010>
11. Napolitano, A. (2020) *Cyclostationary processes and time series: Theory, applications, and generalizations*. Elsevier, Academic Press.
12. Antoni, J., Borghesani, P. (2019) A statistical methodology for the design of condition indicators. *Mech. Syst. Signal Process.*, **114**, 290–327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.012>
13. Randall, R.B., Antoni, J. (2011) Rolling element bearing diagnostics – A tutorial. *Mech. Syst. Signal Process.*, **25**(2), 485–520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.07.017>
14. Patel, V.N., Tandon, N., Pandey, R.K. (2012) Defect detection in deep groove ball bearing in presence of external vibration using envelope analysis and Duffing oscillator. *Measurement*, **45**(5), 960–970. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.01.047>
15. Borghesani, P., Pennacchi, P., Ricci, R., Chatterton, S. (2013) Testing second order cyclostationarity in the squared envelope spectrum of non-white vibration signals. *Mech. Syst. Signal Process.*, **40**(1), 38–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.05.012>
16. Abboud, D., El Badaoui, M., Smith, W., Randall, B. (2019) Advanced bearing diagnostics: A comparative study of two powerful approaches. *Mech. Syst. Signal Process.*, **114**, 604–627. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.011>
17. Antoni, J., Randall, R.B. (2003) A stochastic model for simulation and diagnostics of rolling element bearings with localized faults. *ASME J. Vib. Acoust.*, **125**, 282–289. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1569940>
18. Sawalhi, N., Randall, R.B., Endo, H. (2007) The enhancement of fault detection and diagnosis in rolling element bearings using minimum entropy deconvolution combined with spectral kurtosis. *Mech. Syst. Signal Process.*, **31**(6), 2616–2633. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2006.12.002>
19. Borghesani, P., Pennacchi, P., Randall, R.B. et al. (2013) Application of cepstrum pre-whitening for the diagnosis of bearing faults under variable speed conditions. *Mech. Syst. Signal Process.*, **36**(2), 370–384. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.11.001>
20. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Matsko, I., Zakrzewski, Z. (2022) The least square estimation of the basic frequency

for periodically non-stationary random signals. *Digit. Signal Process.*, **122**, 103333. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103333>

21. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Lychak, O., Matsko, I. (2024) Hilbert transform for covariance analysis of periodically nonstationary random signals with high-frequency modulation. *ISA Transactions*, **144**, 452–481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2023.10.025>

INVESTIGATION OF THE CORRELATION STRUCTURE OF THE VIBRATION SIGNAL OF THE DECANter BEARING ASSEMBLY

I.M. Javorskyj^{1,2}, R.M. Yuzefovych^{1,3}, O.V. Lychak¹, B.R. Komarnytskyi¹, R.I. Khmil³, O.Y. Smirnova³

¹G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine.

E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com

²Bydgoszcz University of Sciences and Technology. 7, Prof. S. Kaliskiego Al., 85796, Bydgoszcz, Poland.

³Lviv Polytechnic National University. 12 S. Bandery Str., 79000, Lviv, Ukraine.

The correlation structure of the vibration signal of the decanter bearing assembly was analyzed using the theory and methods of statistics of periodically non-stationary random processes. Indicators for detecting and evaluating the propagation of the defects have been developed. The relationship between the width of the filtering bandwidth and the parameters of the amplitude spectrum of the signal variation was investigated. 21 Ref., 3 Tabl., 10 Fig.

Keywords: decanter, vibration, trial period, correlation function, spectral density, band filtering, defect development indicator

Отримано 02.05.2024

Отримано у переглянутому вигляді 22.05.2024

Прийнято 11.06.2024

IX Міжнародна зварювальна виставка ExpoWELDING

Міжнародний конгрес-центр в Катовіце, Польща

15–17 Жовтня 2024



9th International Welding Fair ExpoWELDING

International Congress Centre in Katowice, Poland

15–17 October 2024

ExpoWELDING є найважливішою зварювальною виставкою в Польщі та однією з найкращих галузевих у даній галузі в Європі. Серед учасників виставки – представники провідних польських та міжнародних виробників зварювального обладнання, програмного забезпечення, робототехніки та автоматизації. Виставка – це чудова нагода розпочати та розширити ваші ділові відносини.

За традицією, центральне місце на виставці ExpoWELDING займає Міжнародна конференція зі зварювання, організована її головним спонсором: Łukasiewicz Research Network – Institute of Welding. Конференція є можливістю налагодити зв'язки між польською дослідницькою спільнотою та промисловими технологіями та інженерами, а також представити нові відкриття та оцінити поточний стан знань у галузі зварювання.

3300 спеціалістів галузі, майже 100 експонентів з 11 країн, 10 000 м² виставкової площі, 5 додаткових заходів, 63-я престижна міжнародна конференція зі зварювання – це була 8-а виставка ExpoWELDING у цифрах. Присутність лідерів зварювальної галузі та відомих гостей з провідних зварювальних установ робить ExpoWELDING особливо популярним серед спеціалістів галузі.

ExpoWELDING збирає представників таких галузей, як металургія, гірничодобувна промисловість, суднобудування, будівництво, залізничний транспорт, енергетика, харчова та автомобільна промисловість. Серед відвідувачів – спеціалісти зі зварювання, менеджери та інженери виробничих підприємств, які мають можливість ознайомитися з найновішими пристроями та технологіями, призначеними для промислових зварювальних процесів.

Демонстрація найновіших комплексних зварювальних рішень, а також інструментів, які покращують якість та ефективність, – це лише деякі з атракцій, які чекають на ExpoWELDING.

Тематика виставки:

- Зварювальне обладнання та апарати
- Зварювальні матеріали
- Роботизація та автоматизація зварювання
- Пристрої для різання
- Технічні гази
- Обладнання для охорони праці та захисту навколишнього середовища
- Термічна обробка

Виставка проходить у сучасному та престижному Міжнародному конгрес-центрі в Катовіце.

Детальніше: <https://www.expowelding.pl/2024>

ПІДСИЛЕННЯ ДІЛЯНКИ ТРУБОПРОВОДУ АЕС З ДЕФЕКТОМ СТОНШЕННЯ СТІНКИ ПРИ ВСТАНОВЛЕННІ ЗВАРНОЇ ЛАТКИ

Г.В. Ворона, О.С. Костеневич, О.С. Міленін, О.В. Махненко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua

Ремонт трубопроводів АЕС з дефектами ерозійно-корозійного зношення є актуальною проблемою атомної енергетики України. При ремонті трубопроводу вирізають дефектну ділянку та встановлюють за допомогою зварювання нову котушку труби. Але для великої кількості технологічних трубопроводів з виявленими окремими дефектами, недопустимими за розмірами стоншеннями стінки, заміна ділянки труби пов'язана з великим об'ємом ремонтних робіт. Для продовження ресурсу дефектну ділянку трубопроводу можна підсилювати, наприклад, приварюванням накладної латки, наплавленням, встановленням бандажу або зварної муфти. З метою обґрунтування доцільності використання при ремонті трубопроводу підсилюючих конструкцій типу зварна накладна латка проведено скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану прямолінійної ділянки трубопроводу з дефектом ерозійно-корозійного зношення під дією внутрішнього тиску до та після ремонту. Результати аналізу показали високу ефективність розвантаження дефектної ділянки трубопроводу у випадку використання при ремонті підсилюючої конструкції типу зварна накладна латка. Отримані результати можуть бути використані при обґрунтуванні впровадження на АЕС України альтернативних технологій ремонту трубопроводів. Бібліогр. 8, рис. 8.

Ключові слова: АЕС, трубопровід, ерозійно-корозійний знос, дефект стоншення стінки, підсилююча конструкція, зварна накладна латка, напружено-деформований стан, в'язке руйнування, метод скінченних елементів

Вступ. Однією з поширених проблем при довгостроковій експлуатації АЕС є ерозійно-корозійне зношення (ЕКЗ) в трубопроводах. При ремонті дефектну ділянку трубопроводу вирізають і встановлюють нову котушку труби за допомогою зварювання. Даний процес є достатньо трудомістким і вимагає зливання транспортованої рідини. Стосовно трубопроводів першого та другого контурів енергоблоків АЕС така технологія ремонту найбільш надійна та повністю відновлює ресурс трубопроводу. Але для великої кількості технологічних трубопроводів заміна ділянки труби, особливо коли виявлено неприпустимі за розмірами окремі локальні стоншення стінки, може бути надлишковою. В інших галузях, наприклад в магістральному трубопроводному транспорті [1], або в закордонних стандартах [2, 3] існує декілька способів ремонту трубопроводів шляхом підсилення дефектної ділянки, а саме, приварю-

вання накладної латки, наплавлення, встановлення бандажу або зварної муфти. Ефективність підсилення дефектної ділянки шляхом встановлення бандажу або зварної муфти розглядалась раніше [4]. У даній роботі розглянуто варіант підсилення трубопроводу саме зварною накладною латкою. Варіант встановлення накладної латки та його геометричні параметри зображено на рис. 1.

Метою роботи є розрахункове обґрунтування з точки зору міцності можливості використання альтернативної технології ремонту технологічних трубопроводів АЕС з дефектами ЕКЗ шляхом приварювання накладної латки.

Оцінку допустимості подальшої роботи ділянки трубопроводу з дефектом ЕКЗ приймали з точки зору в'язкого руйнування, а саме, за результатами прогнозування приросту інтенсивності пластичних деформацій (деформаційний критерій) у зоні дефекту під дією експлуатаційного

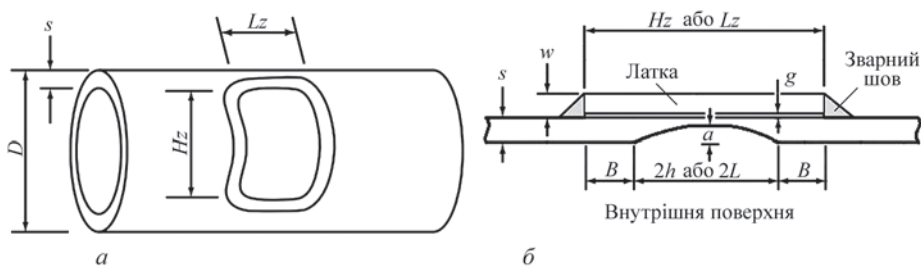


Рис. 1. Схема підсилення дефектної ділянки трубопроводу зварною накладною латкою: а – загальний вид трубопроводу із встановленою латкою; б – переріз у зоні накладної латки

Ворона Г.В. – <https://orcid.org/0000-0002-9724-3759>, Костеневич О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-7427-2805>, Міленін О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-9465-7710>, Махненко О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8583-0163>
© Г.В. Ворона, О.С. Костеневич, О.С. Міленін, О.В. Махненко, 2024

навантаження. Використовуючи метод скінченних елементів, досліджувався вплив геометричних параметрів, а саме, початкового зазору між поверхнею трубопроводу й зварною латкою та лінійного розміру латки відносно розміру дефекту стоншення стінки, а також залишкових зварювальних напружень від приварювання накладної латки на ефективність розвантаження прямолінійної ділянки трубопроводу з дефектом стоншення стінки.

Постановка задачі. У якості прикладу розглядалася прямолінійна ділянка трубопроводу, що має один із стандартних розмірів і параметрів навантаження для технологічних трубопроводів АЕС: матеріал – сталь 20, зовнішній діаметр трубопроводу $D = 630$ мм, товщина стінки $s = 25$ мм, проєктний тиск $P = 11,8$ МПа, температура $T = 300$ °С.

Критично небезпечні геометричні параметри дефекту стоншення стінки трубопроводу (рис. 2, б) визначались за методикою МТ-Т.0.03.224-18 [5] з точки зору можливості подальшої допустимості експлуатації ділянки трубопроводу. Розміри небезпечного дефекту стоншення стінки (ідеалізований дефект ЕКЗ напівеліпсоїдної форми) можуть бути наступними: довжина $L = 2s = 50$ мм, ширина $h = s = 25$ мм, глибина $a = 20$ мм.

Обрано наступні розміри підсилюючої конструкції типу зварна накладна латка: товщина латки дорівнює товщині трубопроводу $W = s = 25$ мм, відстань від краю стоншення до краю латки $B = 70$ мм, довжина латки в окружному напрямку $H_z = 190$ мм, в осьовому $L_z = 240$ мм.

Скінченно-елементна модель. За даними параметрами побудовано геометричну та скінченно-елементну модель прямолінійної ділянки трубопроводу з дефектом ЕКЗ. Внаслідок симетрії в двох (повздовжній і поперечній) площинах побудована модель складається з 1/4 частини від повної моделі (рис. 2, а). Механічні

властивості матеріалу наступні: модуль Юнга $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнт Пуасона $\mu = 0,3$, границя текучості для сталі 20 при температурі $T = 300$ °С $\sigma_T = 177$ МПа [2]. Відповідним чином було створено скінченно-елементну модель з використанням зварної латки.

Задача напружено-деформованого стану дефектної ділянки трубопроводу розглядалась у пружно-пластичній постановці, тому що в зоні дефекту ЕКЗ під дією внутрішнього тиску можливе утворення пластичних деформацій. У зоні дефекту на внутрішню поверхню труби діє робочий тиск $P = 11,8$ МПа. До торцевої поверхні моделі в якості граничної умови додано осьові розтягувальні напруження [8]:

$$\sigma_{zz} = \frac{P \cdot D/2}{2s} \rightarrow \sigma_{zz} = 72,6 \text{ МПа} \quad (1)$$

Мінімальний розмір скінченних елементів (гексагональний об'ємний елемент) сітки моделі дорівнює 3 мм (рис. 3, б). Мінімальний розмір елементів побудованої сітки був обраний виходячи з умови, що значення максимальної еквівалентної пластичної деформації змінюється менш ніж на 5 % при зменшенні мінімального розміру сітки в 2 рази.

У трубопроводах з виявленими дефектами ЕКЗ характер руйнування під дією внутрішнього тиску, як правило, зумовлений в'язким механізмом. Для прогнозування критичного стану при в'язкому руйнуванні під дією внутрішнього тиску матеріалу трубопроводу з дефектом ерозійно-корозійного зношення використано деформаційний критерій [7]:

$$\int \frac{d\varepsilon_i^p}{\varepsilon_c} > 1 \quad (2)$$

де $d\varepsilon_i^p$ – приріст інтенсивності пластичних деформацій; ε_c – критичне значення пластичної деформації, що залежить від жорсткості напруженого стану, температури, неоднорідності матеріалу тощо.

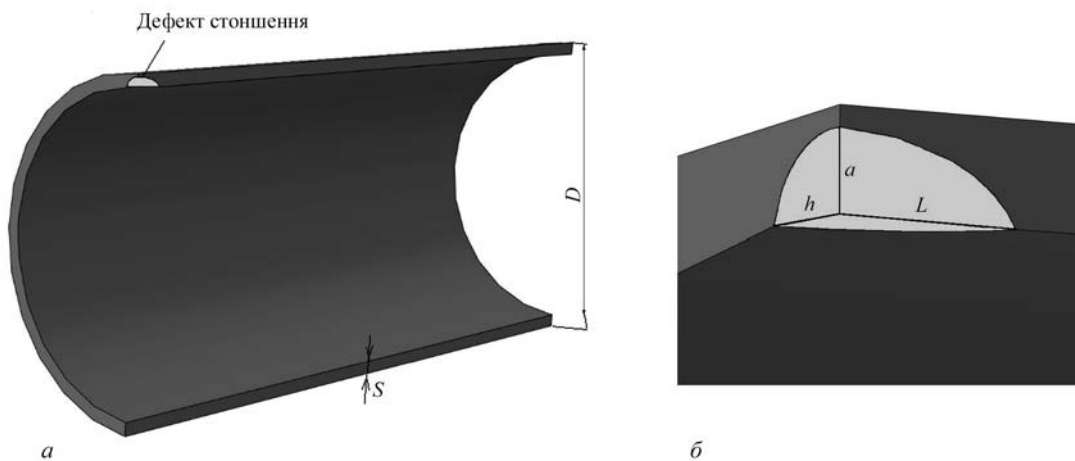


Рис. 2. Геометрична модель прямолінійної дефектної ділянки трубопроводу (1/4 частина) (а) та внутрішнього напівеліптичного дефекту стоншення стінки (б)

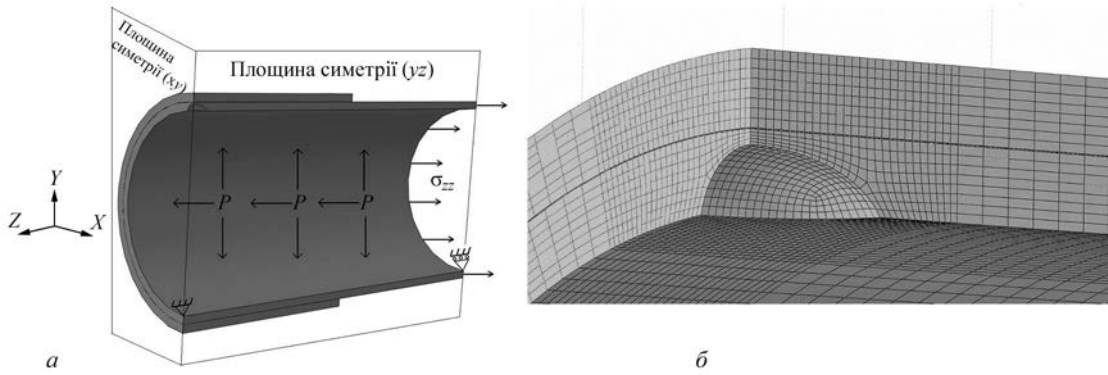


Рис. 3. Скінченно-елементна модель прямолинійної ділянки трубопроводу з дефектом стоншення стінки та підсилюючою зварною накладною латкою: *a* – схема моделі; *б* – сітка скінченних елементів у зоні дефекту

Результати скінченно-елементного аналізу НДС. Результати проведеного аналізу НДС ділянки трубопроводу без підсилюючої конструкції показали, що під дією внутрішнього тиску величиною $P = 11,78$ МПа в дефектній зоні виникають максимальні колові напруження до 227 МПа (рис. 4), що перевищує границю текучості матеріалу (177 МПа).

Номінально допустиме напруження статичної міцності визначається згідно з ПНАЕ Г 7-002-86 [6] за умови:

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{\sigma_B}{2,6}; \frac{\sigma_T}{1,5} \right\} \quad (3)$$

При температурі $T = 300$ °С границя текучості та границя міцності складають $\sigma_T = 177$ та $\sigma_B = 363$ МПа відповідно. Згідно з (3) допустиме напруження становить $[\sigma] = 118$ МПа. Такий підхід, що базується на порівнянні діючих напружень стінки трубопроводу, утворених від внутрішнього тиску, з допустимими напруженнями для матеріалу трубопроводу на практиці використовується

для визначення номінальних розмірів під час проектування. Оцінюючи граничний стан, який визначається розвитком в'язкого руйнування матеріалу трубопроводу з дефектом стоншення, даний підхід надто консервативний. Доцільнішим є наведений вище (2) підхід, заснований на аналізі результатів приросту інтенсивності пластичних деформацій у дефектній зоні.

За результатами скінченно-елементного аналізу у випадку дефектної ділянки трубопроводу без підсилюючої конструкції максимальні колові напруження (227 МПа) перевищують допустимі напруження та досягають границі текучості матеріалу (рис. 4, *a*), а максимальна інтенсивність пластичних деформацій (рис. 5, *a*) в зоні дефекту ЕКЗ становить $d\varepsilon_i^p = 0,011$ (1,1 %). Даний приріст інтенсивності пластичних деформацій перевищує встановлену «умовну» граничну величину $\varepsilon_c = 0,01$ (1%) [7]. Тобто можна припустити, що створюються умови початку розвитку в'язкого руйнування матеріалу.

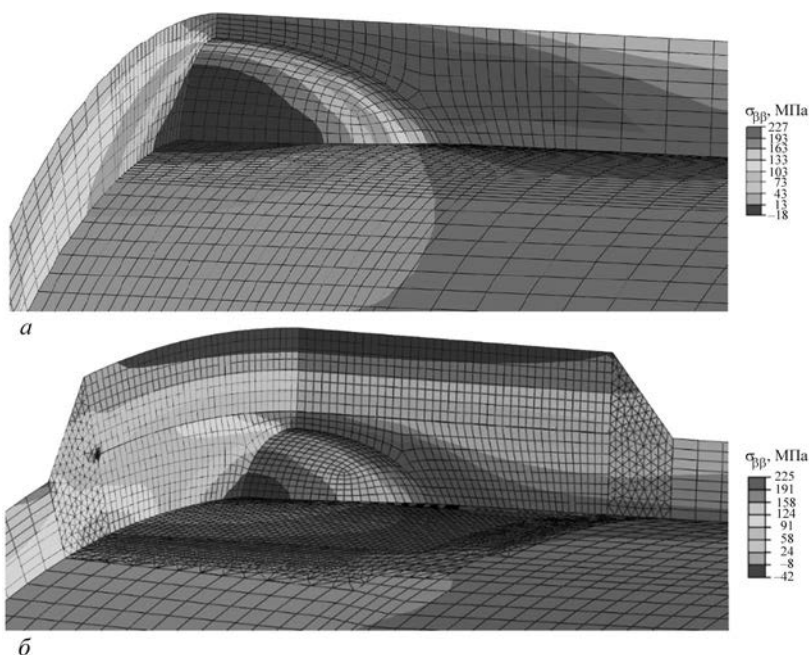


Рис. 4. Розподіл колових напружень σ_{ϕ} у дефектній зоні ділянки трубопроводу: *a* – без підсилюючої конструкції; *б* – з накладною латкою

У випадку дефектної ділянки трубопроводу із встановленою накладною латкою, хоч максимальні колові напруження (225 МПа) все ще перевищують допустимі напруження і досягають границі текучості матеріалу (рис. 4, б), але максимальна інтенсивність пластичної деформації (рис. 5, б) знизилася до $d\varepsilon_i^p = 0,004$ (0,4 %) і вже не перевищує граничну деформацію 1 %. Таким чином, встановлення підсилюючої конструкції типу зварна накладна латка ефективно сприяє запобіганню розвитку пластичних деформацій та руйнуванню трубопроводу в зоні дефекту стоншення стінки під дією внутрішнього тиску.

Вплив початкового зазору. Отримані результати чисельного прогнозування напружено-деформованого стану дефектної ділянки трубопроводу при її підсиленні встановленням накладної латки показали, що величина зазору g між поверхнями трубопроводу та латки при її встановленні не має впливу на ефективність розвантаження дефектної ділянки (рис. 6, а). Тобто розвантаження відбувається не за рахунок контактної взаємодії між по-

верхніми трубопроводу та латки, а в результаті підсилення дефектної ділянки через зварне з'єднання накладної латки. Це є важливою перевагою такої ремонтної технології, тому що перед встановленням зварної накладної латки не потрібно проводити ретельних робіт із підготовки поверхні латки та притискання її до поверхні трубопроводу.

Вплив розмірів накладної латки. Іншим важливим параметром технології підсилення дефектної ділянки трубопроводу зварною накладною латкою є геометричні розміри латки. Товщину латки прийнято брати рівною товщині стінки трубопроводу, який підсилюється, оскільки у випадку розвитку дефекту ЕКЗ наскрізь накладна латка буде мати несучу здатність, близьку до несучої здатності стінки трубопроводу. А лінійний розмір накладної латки повинен бути більше розмірів дефекту стоншення стінки. На рис. 1 це збільшення розмірів з кожної сторони накладної латки позначено як розмір B – відстань від краю дефекту до краю латки. Мінімальний розмір B повинен бути [3]:

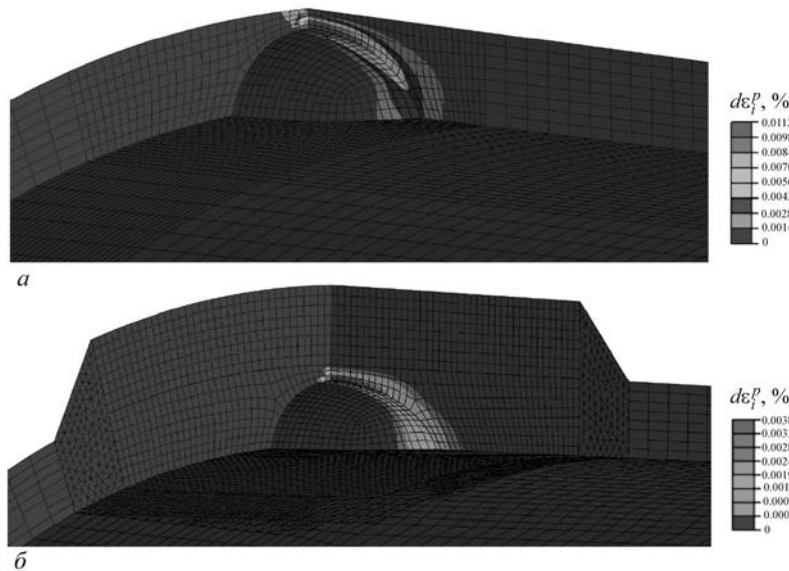


Рис. 5. Розподіл приросту інтенсивності пластичних деформацій в дефектній зоні ділянки трубопроводу: а – без підсилюючої конструкції $d\varepsilon_i^p = 0,011$; б – з накладною латкою $d\varepsilon_i^p = 0,004$

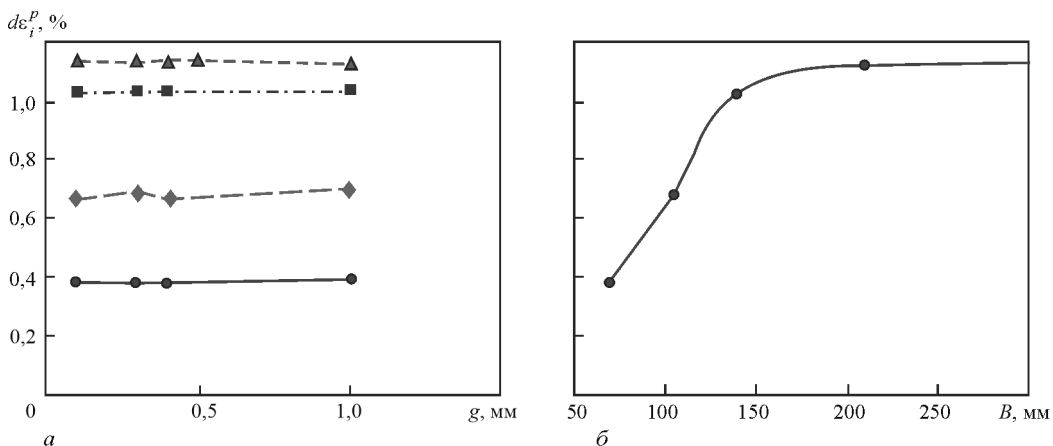


Рис. 6. Залежність максимальних значень приросту інтенсивності пластичних деформацій $d\varepsilon_i^p$ в зоні дефекту трубопроводу від величини зазору g (а) та для різних за розміром B накладних латок (б): ● – $B = 70$ мм; ◆ – 105; ■ – 140; ▲ – 210

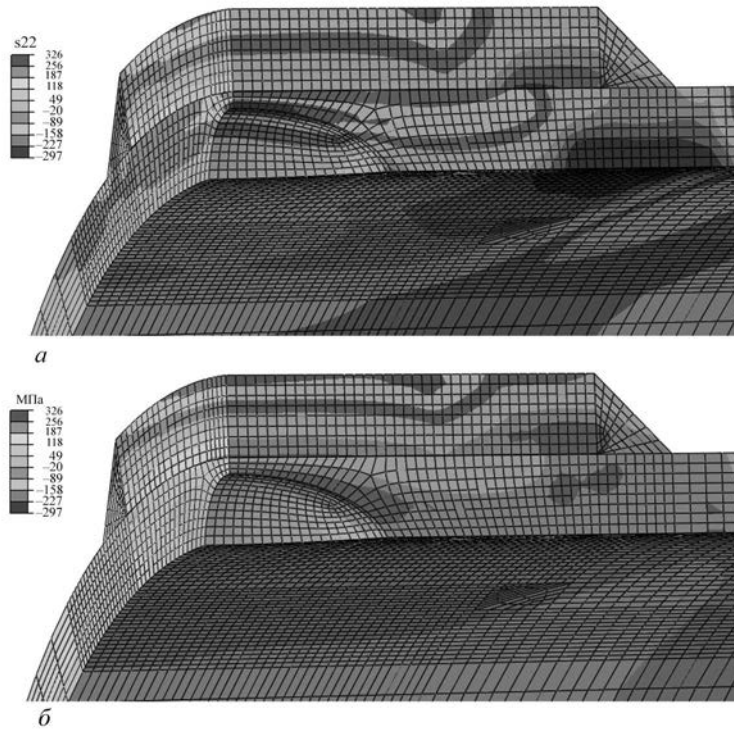


Рис. 7. Розподіл колових напружень в зоні дефектної ділянки трубопроводу з накладною латкою: *a* – залишкові зварювальні напруження; *б* – від експлуатаційного навантаження з урахуванням залишкових зварювальних напружень

$$B = \frac{3}{4} \sqrt{\frac{D \cdot s}{2}} = \frac{3}{4} \sqrt{\frac{630 \cdot 25}{2}} \approx 70 \text{ мм} \quad (4)$$

Результати прогнозування впливу розміру *B* на розвантаження дефектної ділянки трубопроводу (рис. 6) показали, що при збільшенні лінійного розміру латки приріст інтенсивності пластичних деформацій від експлуатаційного навантаження в зоні стоншення стінки значно зростає, тобто ефективність підсилюючої конструкції зменшується. Це також пояснюється тим, що підсилення дефектної ділянки відбувається через зварне з'єднання накладної латки, і чим більше віддаляється зварне з'єднання від зони стоншення стінки, тим нижче стає ефективність розвантаження в зоні стоншення. Тому при ремонті доцільніше використовувати мінімально допустимі лінійні розміри накладних латок, що матиме більшу ефективність підсилення дефектної ділянки, зменшить витрати на матеріали та час на зварювання.

Вплив залишкових зварювальних напружень. Враховуючи, що зварні з'єднання накладної латки

можуть впливати на НДС зони дефекту трубопроводу, було проведено чисельне визначення залишкового стану дефектної ділянки після приварювання накладної латки. Зварювання проводилось кутовим швом за три проходи. Швидкість зварювання 2 мм/с, погона енергія першого проходу 23219 Дж/см, другого і третього – 28528 Дж/см.

Залишкові напруження та деформації визначались у результаті термопластичного аналізу методом скінченних елементів у результаті простежування за часом кінетики напружень і деформацій під дією термічних циклів нагріву та охолодження при виконанні кожного зварювального проходу по краю накладної латки.

Згідно з результатами чисельного дослідження (рис. 7) у зоні зварних з'єднань накладної латки утворюються високі (до границі текучості і вище) розтягувальні залишкові напруження, які в зоні дефекту стоншення стінки викликають появу врівноважуючих високих стискувальних напружень

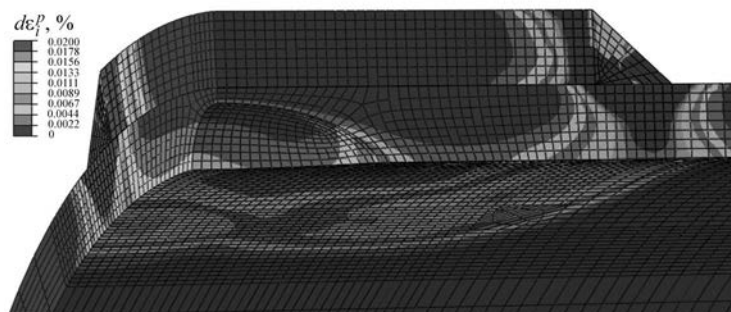


Рис. 8. Розподіл інтенсивності пластичних деформацій $d\varepsilon_p^p$ ділянки трубопроводу з дефектом стоншення стінки з накладною латкою після зварювання та навантаження внутрішнім тиском і температурою (в зоні стоншення $d\varepsilon_p^p = 0,001 \dots 0,002$)

до –200 МПа. При експлуатаційному навантаженні під дією внутрішнього тиску $P = 11,8$ МПа і температури $T = 300$ °С залишкові напруження перерозподіляються та в зоні дефекту стоншення стінки утворюється напружений стан (рис. 7), який характеризується меншою за розмірами зоною високих розтягувальних напружень (до границі текучості матеріалу) у порівнянні з даними без урахування зварювальних залишкових напружень (рис. 4, б). Відповідно приріст інтенсивності пластичних деформацій $d\varepsilon_i^p$ в зоні стоншення стінки дефектної ділянки трубопроводу від експлуатаційного навантаження зменшився з 0,004 до 0,001...0,002 (рис. 8). Можна зробити висновок, що стискувальні залишкові напруження, які утворюються в зоні стоншення стінки в результаті приварювання накладної латки, можуть сприяти підвищенню ефективності підсилення дефектної ділянки трубопроводу.

Висновки

Результати проведеного комплексу розрахункових досліджень ефективності розвантаження дефектної ділянки трубопроводу з дефектом ЕКЗ показали, що встановлення зварної накладної латки може бути ефективною технологією ремонту технологічних трубопроводів з дефектами ЕКЗ для потреб атомної енергетики. Визначено, що:

1. Доцільно використовувати мінімально допустимі розміри накладних латок, що забезпечує найбільшу ефективність розвантаження дефектної ділянки трубопроводу та зменшує витрати на матеріали і час ремонту.

2. Суттєвою перевагою зварних накладних латок перед бандажами та зварними муфтами є те, що початковий зазор між підсилюючою конструкцією у випадку зварної накладної латки не впливає на ефективність розвантаження дефектної ділянки трубопроводу. Цей фактор дозволяє значно знизити трудомісткість процесу підготовки та встановлення (приварювання) латки при ремонті трубопроводу.

REINFORCEMENT OF AN NPP PIPELINE WITH A WALL THINNING DEFECT BY APPLYING EXTERNAL WELD OVELAY

G.V. Vorona, O.S. Kostenevych, O.S. Milenin, O.V. Makhnenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevich str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: makhnenko@paton.kiev.ua

Repair of NPP pipelines with erosive and corrosive wear defects is an urgent problem of the nuclear power industry of Ukraine. When repairing the pipeline, the defective section is cut out and a new pipe coil is installed by welding. But for a large number of technological pipelines with identified isolated defects, inadmissible wall thinning, replacement of a pipe section is associated with a large volume of repair work. To extend the service life, the defective section of the pipeline can be reinforced, for example, by welding an external overlay, building-up, installing a bandage or a welded sleeve. In order to justify the expediency of using reinforcing structures of welded external overlay type at pipeline repair, a finite-element analysis of the stress-strain state of a straight section of the pipeline with an erosion-corrosion wear defect under the action of internal pressure before and after repair was carried out. The results of the analysis showed a high efficiency of reinforcing the defective section of the pipeline in the case of using a welded external overlay at repair. The obtained results can be used at justifying the introduction of alternative pipeline repair technologies at NPPs of Ukraine. 8 Ref., 8 Fig.

Keywords: NPP, pipeline, erosion-corrosion wear, wall thinning defect, reinforcing structure, welded external overlay, stress-strain state, ductile fracture, finite element method

3. Стискувальні залишкові напруження, які утворюються в зоні стоншення стінки в результаті приварювання накладної латки, можуть сприяти підвищенню ефективності підсилення дефектної ділянки трубопроводу.

Список літератури/References

- (2011) ГБН В.3.1-00013741-12:2011. *Магістральні газопроводи, ремонт дуговим зварюванням в умовах експлуатації*. Київ, Міністерство енергетики та вугільної промисловості України.
(2011) GBN V.3.1-00013741-12:2011. *Main gas pipelines. Repair by arc welding in service conditions*. Ministry of Energy and Coal of Ukraine [in Ukrainian].
- Jaske, Carl E., Hart, Brian O., Bruce, William A. (2006) *Updated pipeline repair manual*. R2269-01R, United States.
- Repair of Pressure Equipment and Piping*. An American national standard. ASME PCC-2-2018 (Revision of ASME PCC-2-2015).
- Ворона Г.В., Махненко О.В., Міленін О.С. (2023) Ефективність розвантаження ділянки трубопроводу АЕС з дефектом стоншення стінки при встановленні бандажу або зварної муфти. *Техн. діагност. та неруйнів. контроль*, 4, 11–19. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.04.02>
- Vorona, G.V., Makhnenko, O.V., Milenin, O.S. (2023) Effectiveness of unloading a section of NPS pipeline with a pipe wall thinning defect by mounting a band or welded sleeve. *Tekh. Diagnost. ta Neruyniv. Kontrol*, 4, 11–19. [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.04.02>
- (2019) *Методика определения допустимых толщин элементов трубопроводов АЭС из углеродистых сталей подверженных действию эрозивно-коррозионного износа МТ-Т.0.03.224-18*. ПИ НАЭК «Энергоатом».
(2019) МТ-Т.0.03.224-18 *Procedure for determination of acceptable thicknesses of NPP pipeline elements from carbon steels subjected to erosion-corrosion wear*. NAEK Energoatom [in Russian].
- (1989) ПНАЭ Г-7-002-86 *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок*. Москва, Энергоатомиздат.
(1989) PNAE G-7-002-86 *Norms of strength analysis of equipment and pipelines of nuclear power plants*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
- Milenin, A., Velikoivanenko, E., Rozyuka, G., Pivtorak, N. (2019) Probabilistic procedure for numerical assessment of corroded pipeline strength and operability. *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, 171, 60–68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.02.003>
- Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. (1966) *Пластинки и оболочки*. Москва, Наука.
Timoshenko, S.P., Voinovsky-Krieger, S. (1966) *Plates and shells*. Moscow, Nauka [in Russian]

Отримано 23.04.2024

Отримано у переглянутому вигляді 17.05.2024

Прийнято 10.06.2024

АВТОМАТИЗОВАНЕ ДЕТЕКТУВАННЯ ДЕФЕКТІВ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ НА ОСНОВІ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ YOLOV5

А.С. Момот, В.В. Крецул, О.В. Муравйов, Р.М. Галаган

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський просп., 37. E-mail: drewmomot@gmail.com, asnk@kpi.ua

У роботі розглянуто можливості застосування моделі глибинного навчання YOLOv5s у задачі автоматизації процесу детектування поверхневих дефектів на друкованих платах. Сучасні друковані плати виготовляються у великих обсягах і містять значну кількість елементів. Технологічний процес виготовлення друкованих плат є складним, що підвищує ймовірність виникнення дефектів розведення плати, таких як короткі замикання, розриви, «укуси миші» тощо. Дані дефекти є поверхневими та можуть бути виявлені за допомогою візуально-оптичного контролю. У порівнянні з іншими методами візуально-оптичний легше піддається автоматизації. Доведено, що перспективним є застосування моделей глибинного навчання для автоматизації процесу виявлення об'єктів на зображеннях. Сучасні нейронні мережі можуть автоматично з високою достовірністю детектувати поверхневі дефекти на зображеннях друкованих плат. У статті розглянуто клас моделей YOLO. Встановлено, що модель YOLOv5 має кращі показники швидкодії та достовірності розпізнавання, ніж попередні модифікації. У даному дослідженні реалізовано та навчено модель YOLOv5s для перевірки ефективності роботи даної мережі в задачі автоматизованого детектування поверхневих дефектів друкованих плат. Для навчання використовувався відкритий набір даних «PCB Defects». Проведено якісний та кількісний аналіз ефективності роботи навченої мережі на тестовому наборі даних. Встановлено, що мережа здатна детектувати поверхневі дефекти друкованих плат з достовірністю 92,5 % за показником mAP50. Додатково проаналізовано результати розпізнавання різних класів дефектів і надано рекомендації щодо подальшого вдосконалення системи. Зокрема, перспективним є застосування аугментації навчальних даних і використання складнішої архітектури моделі глибинного навчання. Бібліогр. 15, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: дефекти друкованих плат, детектування об'єктів, глибинне навчання, YOLOv5

Вступ. Автоматизація виробництва електронних модулів є важливою складовою у сучасному виготовленні радіоелектронної апаратури. Забезпечення якості та надійності електронних модулів є ключовим етапом цього процесу, а своєчасне виявлення дефектів є надзвичайно важливим завданням. Наслідком встановлення несправних електронних плат у прилади може стати підвищення загальних витрат на виробництво та сервісне обслуговування радіоелектронної апаратури, а також можливе травмування кінцевого користувача. Тому раннє виявлення дефектів є надзвичайно критичним і має велике значення для забезпечення бездоганної якості та безпеки використання електронних пристроїв.

У сучасних умовах спостерігається тенденція до зменшення розмірів електронних модулів і компонентів для отримання більшої компактності пристроїв, в яких вони будуть використовуватись. Ще одним важливим фактором є значне зростання обсягів виробництва електронних пристроїв. У зв'язку з цим, виникає необхідність використання новітніх методів автоматизації процесу контролю дефектів друкованих плат. З точки зору оптимального поєднання інформативності, швидкодії та простоти автоматизації, одним із найперспек-

тивніших методів виявлення дефектів друкованих плат є візуально-оптичний контроль.

Візуально-оптичний контроль забезпечує можливість виявлення широкого спектру поверхневих дефектів, таких як пошкодження компонентів, неправильне розташування або з'єднання, дефекти паяння та багато інших. Цей метод дозволяє отримувати об'єктивні результати, що зменшує вплив людського фактору. Використання комп'ютерного зору, алгоритмів обробки зображень і машинного навчання дозволяє автоматизувати процес контролю з високою швидкістю та достовірністю [1]. Завдяки цьому метод ефективно використовується у задачах контролю якості друкованих плат навіть за великих обсягів виробництва.

Серед методів комп'ютерного зору одним із найперспективніших є використання моделей глибинного навчання. Глибокі нейронні мережі можуть досягати високих рівнів достовірності у виявленні об'єктів на зображеннях [2]. Завдяки здатності нейронних мереж вивчати складні патерни та залежності, вони ефективно впораються із виявленням навіть невеликих і складних дефектів, які може бути важко визначити за допомогою традиційних методів.

Аналіз стану проблеми. Друковані плати виготовляються за допомогою спеціальної технології. Спочатку проектується схема, яка включає компоненти, з'єднувальні шляхи та інші елементи. Цей проект потім переноситься на базовий матеріал, яким зазвичай є полімерна плата. Даний процес дозволяє створити фізичну основу для компонентів і дрітків. Після перенесення схеми на базовий матеріал проводиться ряд операцій для створення друкованої плати. Один з етапів – нанесення шарів міді на плату. Шари міді утворюють провідні доріжки, які забезпечують електричне з'єднання між компонентами. Після нанесення міді плату піддають процесу експонування, що дозволяє сформувати контури шляхів і площадок за допомогою фоточутливого матеріалу та масок [3].

Після експонування та видалення зайвих шарів міді плата проходить через травильні розчини, які видаляють непотрібні частинки міді. Цей процес дозволяє сформувати чіткі контури шляхів і площадок, забезпечуючи належну функціональність друкованої плати. Після травлення проводяться інші види обробки, такі як монтаж отворів для компонентів, нанесення захисного шару та покриття плати припоєм. Ці кроки дозволяють забезпечити захист від корозії, підвищити міцність і додати довговічності до друкованої плати.

Під час виробництва, монтажу та використання друкованих плат можуть виникати різні види дефектів, які можуть впливати на їхню функціональність і надійність. Дефекти провідників є одними з найпоширеніших проблем на друкованих платах. Основними видами дефектів провідників є коротке замикання, розрив, «укус миші», шпора, зайва мідь, відсутність отвору [4]. Оскільки дані дефекти є поверхневими, їх можна виявити за допомогою візуально-оптичного контролю. Приклади зображень деяких із перелічених видів дефектів з відкритого набору даних [5] показані на рис. 1.

Візуально-оптичний контроль має важливу перевагу – простоту автоматизації процесу. Завдяки використанню комп'ютерного зору, алгоритмів обробки зображень і машинного навчання, можна розробити програмне забезпечення, яке здатне ав-

томатизовано аналізувати зображення друкованих плат і виявляти наявність дефектів. Це дозволяє значно зменшити залежність від людського фактору, підвищити швидкість і точність контролю, а також знизити витрати на ручну роботу.

Основний принцип методів глибокого навчання полягає в тому, що нейронна мережа навчається на великому наборі зображень друкованих плат, які вже мають позначення щодо наявності або відсутності дефектів та їх положення. Після завершення процесу навчання модель може автоматично аналізувати нові зображення та виконувати детектування дефектів. Глибокі нейронні мережі можуть бути використані для різних завдань виявлення дефектів на друкованих платах, таких як виявлення візуальних аномалій, класифікація дефектів, детектування дефектів і сегментація дефектних областей.

Отже, нейронні мережі є потужним інструментом для виявлення дефектів на друкованих платах. Вони можуть вивчати складні залежності, автоматично визначати діагностичні ознаки, працювати з великими обсягами даних. Це дозволяє в значній мірі автоматизувати процес контролю. Використання нейронних мереж дозволяє досягти високої точності та надійності виявлення дефектів, сприяє прискоренню процесу контролю та зниженню витрат у виробництві.

Автори [6] детально розглядають проблеми контролю якості друкованих плат і пропонують методи автоматизованого оптичного контролю для виявлення дефектів. Робота розпочинається з огляду наявних методів контролю дефектів на друкованих платах та їхніх обмежень. Вона показує, що традиційні методи, такі як візуальний огляд, мають обмежену ефективність і можуть бути витратними та займати багато часу. Тому автори пропонують використовувати автоматизовані системи оптичного контролю на базі нейронних мереж для покращення якості та швидкості процесу контролю дефектів.

Автори [7] стверджують, що через складність умов виробництва друкованих плат більшість попередніх робіт все ще використовують традиційні

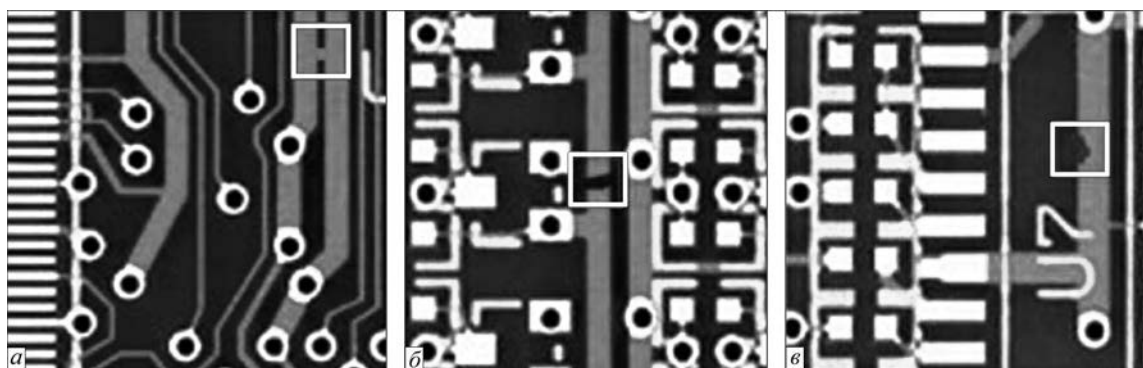


Рис. 1. Приклади поверхневих дефектів друкованих плат: *a* – коротке замикання; *b* – розрив; *v* – «укус миші»

алгоритми обробки зображень для автоматизованого виявлення дефектів друкованих плат. Вони запропонували вдосконалений підхід до виявлення дефектів друкованої плати шляхом вивчення глибоких дискримінантних ознак. Це значно зменшило високі вимоги до великого набору даних для методу глибокого навчання. Результати показують кращу продуктивність у класифікації дефектів, ніж інші традиційні методи, засновані на ручному виявленні ознак. За словами авторів, запропонований метод має найвищий показник «mean Average Precision» (mAP) на рівні 99,59 %, що на 8 % перевищує другий за ефективністю метод, який базується на комбінації Alexnet і SVM. Таке значне зростання демонструє високу ефективність глибокого навчання в задачах виявлення поверхневих дефектів друкованих плат. Проте у даній роботі мережа навчалася на штучно створених навчальних зображеннях. Тому при реальному застосуванні показники достовірності контролю можуть відрізнятись.

У [8] стверджується, що традиційні алгоритми, яким заважає неефективність і обмежена точність, не відповідають вимогам сучасних стандартів. На відміну від них, алгоритми виявлення дефектів друкованих плат, засновані на глибокому навчанні, демонструють підвищену достовірність та ефективність. Це додатково підкріплюється їх здатністю навчатись і розпізнавати нові типи дефектів. У дослідженні наведено комплексний аналіз алгоритмів виявлення дефектів друкованих плат на основі машинного зору, який охоплює сфери машинного та глибинного навчання. Автори зазначають, що впровадження безкоштовних наборів даних для виявлення дефектів друкованих плат покращує можливості для оцінки ефективності алгоритмів. Згідно з дослідженнями, в даний час достовірність виявлення та правильної класифікації дефектів може перевищувати 95 % mAP при «Intersection over Union» (IoU) на рівні 0,5. З метою потенційного покращення результатів автори визначили перспективні напрямки майбутніх досліджень для вирішення існуючих проблем у задачах автоматизації виявлення поверхневих дефектів друкованих плат. За результатами досліджень, серед існуючих моделей глибинного навчання найкращу ефективність детектування дефектів друкованих плат демонструє сімейство моделей YOLO.

У [9] для контролю якості друкованих плат пропонується алгоритм глибокого навчання, заснований на використанні моделі «You Look Only Once» (YOLO). У запропонованому методі кваліфіковані інженери з контролю якості спочатку використовують відеоінтерфейс для запису та маркування дефектних друкованих плат. Потім ці

дані використовуються для навчання базової моделі YOLO для виявлення поверхневих дефектів. У цьому дослідженні було використано 11000 навчальних зображень. Запропонована авторами нейронна мережа складається з 24 згорткових і 2 повнозв'язних прошарків. Розглянута модель досягла достовірності виявлення дефектів на рівні 98,79 % за показником mAP. Такий результат підтверджує високу ефективність даних моделей. Проте розглянута авторами архітектура мережі на даний час є застарілою. Тому існує необхідність дослідження сучасніших модифікацій YOLO.

У [10] також стверджується, що традиційний метод ручного виявлення дефектів друкованих плат може не відповідати необхідним виробничим стандартам через високий рівень помилок. У цій роботі автори пропонують вдосконалений алгоритм, заснований на використанні YOLOv4. У дослідженні використовується набір даних про дефекти друкованих плат, опублікований Лабораторією інтелектуальних роботів Пекінського університету, який містить велику кількість зображень різних типів дефектів, що значно підвищує надійність моделі. Автори аналізують розподіл ознак структурного шару CSPDarkNet53 і розподіл розмірів дефектів у наборі даних. На етапі попередньої обробки та введення даних зображення автоматично поділяється відповідно до середнього розміру дефекту на зображенні. Таким способом збільшується ймовірність того, що ділянка містить зображення дефекту. Експериментальні результати показують, що покращений алгоритм на основі YOLOv4 має показник mAP на рівні 96,88 %.

Незважаючи на переваги, дослідники відзначають деякі виклики та обмеження методів глибинного навчання для контролю дефектів друкованих плат. Наприклад, це необхідність наявності великого обсягу попередньо оброблених зображень дефектів для навчання моделей, а також важкість управління різноманітністю та репрезентативністю дефектів.

У цілому, автоматизований візуально-оптичний контроль з використанням моделей глибинного навчання є потужним інструментом для виявлення поверхневих дефектів на друкованих платах. Враховуючи швидкий прогрес у сфері машинного навчання, можна очікувати подальшого розвитку цього підходу для контролю дефектів друкованих плат. Одним із перспективних напрямів досліджень є використання моделей сімейства YOLO. Саме ці моделі демонструють найкращі результати на різних наборах навчальних даних. Особливий інтерес становить модифікація YOLOv5, ефективність якої в задачах автоматизованого детектуван-

ня дефектів друкованих плат на даний момент не була достатньо висвітлена в наукових публікаціях.

Постановка задачі. Метою даного дослідження є аналіз ефективності застосування нейронної мережі YOLOv5 при автоматизованому виявленні поверхневих дефектів на зображеннях друкованих плат. Такий підхід дозволить в автоматизованому режимі виявляти місце розташування дефектів і проводити класифікацію за типом. У реальній системі зображення об'єкту контролю надходять до блоку інтелектуального цифрового опрацювання зі спеціальної камери, встановленої на виробничій лінії або безпосередньо над виробом. Зображення в автоматичному режимі опрацьовуються нейронною мережею. На виході нейромережевого модуля отримується зображення, на якому дефекти виділяються в рамку та класифікуються за типом.

Опис нейромережевої моделі. YOLO – це архітектура нейронних мереж для детектування об'єктів і класифікації, яка має значний прогрес у швидкості та точності порівняно зі своїми попередниками. Одна з головних переваг даної моделі полягає в тому, що вона має високу швидкість обробки зображень. Це дозволяє використовувати її для роботи в реальному часі на мобільних пристроях. Крім того, YOLO показує високу точність виявлення об'єктів на різних наборах даних. Базова версія архітектури YOLO описана в [11].

Проте у початкової версії YOLO також є деякі недоліки. Наприклад, архітектура може мати проблему з виявленням малих об'єктів або об'єктів, форма яких може змінюватись. Також можуть виникати проблеми з локалізацією об'єктів, особливо коли вони перекриваються або мають схожі ознаки. Тому дана модель має велику кількість модифікацій, які покращують її ефективність.

YOLOv5 (You Only Look Once version 5) є оновленою версією алгоритму YOLO, яка була представлена в 2020 р. [12]. YOLOv5 має декілька розмірів моделей, таких як YOLOv5s, YOLOv5m, YOLOv5l та YOLOv5x, які відрізняються за кількістю прошарків та обчислювальною потужністю. Наприклад, модель YOLOv5x має близько 88 мільйонів параметрів. Узагальнену архітектуру YOLOv5 описано в [13] та показано на рис. 2.

YOLOv5 також відрізняється високою точністю виявлення об'єктів. Наприклад, модель YOLOv5x досягає близько 47 % mAP на датасеті MS COCO при використанні роздільної здатності 640×640 і тренуванні протягом 300 епох. Кількість внутрішніх параметрів залежить від розміру моделі, від XS (14 мільйонів параметрів) до XL (177 мільйонів параметрів). Швидкодія теж може варіюватися залежно від розміру моделі.

У моделі YOLOv5 використовується функція активації Mish, що є нелінійною функцією, яка використовується для введення нелінійності в нейронній мережі. Вона визначається наступним чином:

$$\text{Mish}(x) = x \cdot \tanh(\text{softplus}(x)) \quad (1)$$

Функція активації Mish має плавний градієнт, що допомагає уникнути проблеми з затуханням градієнта, яка може виникати в інших функціях активації, таких як Sigmoid або ReLU. Вона також дозволяє зберегти більше інформації у вихідному сигналі, що може покращити точність моделі.

У порівнянні з YOLOv1 та YOLOv3, YOLOv5 має кращу швидкість і точність. Вона також забезпечує простішу та легшу використовувану архітектуру, що робить її зручним варіантом для розробників і дослідників. Порівняння кількісних характеристик різних модифікацій YOLO наведе-

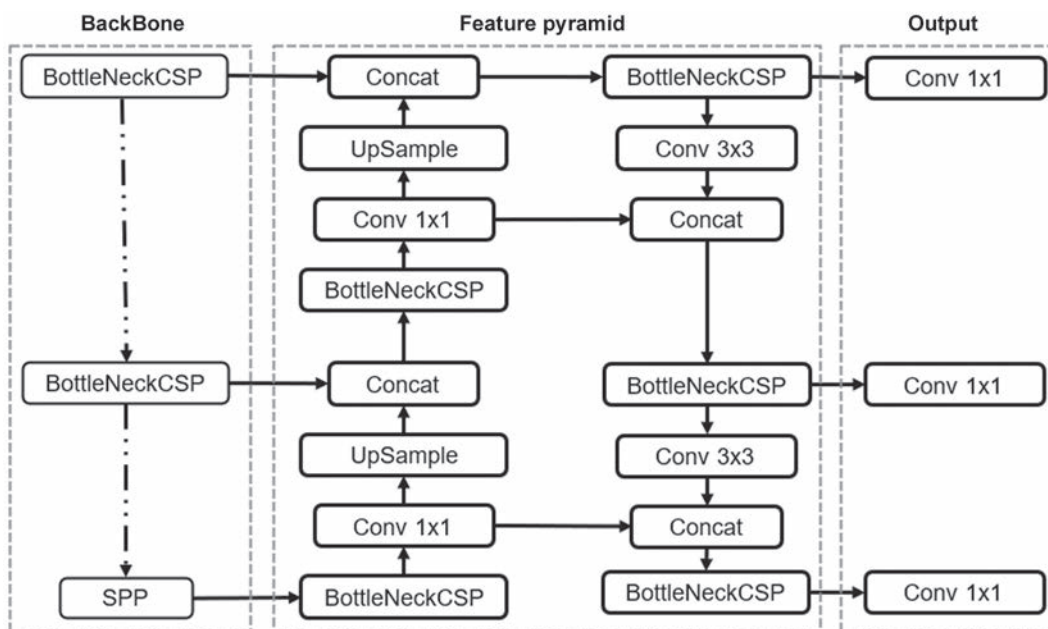


Рис. 2. Архітектура YOLOv5

Таблиця 1. Порівняння модифікацій YOLO

Параметр	YOLOv1	YOLOv3	YOLOv5
Швидкодія	45...60 FPS	20...30 FPS	20...40 FPS
Внутрішні параметри	45,0М	61,0М	85,0М
mAP	63 %	57 %	70 %

дено в табл. 1. Всі вказані моделі були навчені та протестовані на наборі даних MS COCO [14].

Узагальнюючи вищенаведене, YOLOv5 виступає як кращий вибір порівняно з попередніми модифікаціями. Вона забезпечує баланс між точністю та продуктивністю, що робить її популярним рішенням для різноманітних завдань виявлення об'єктів.

Метрики для виявлення об'єктів. Наступні метрики використовуються для порівняння та оцінки ефективності алгоритмів детектування об'єктів. Вони допомагають визначити, наскільки точно та повно виявляються об'єкти, а також як алгоритм справляється з різними розмірами та орієнтацією об'єктів. Використання цих метрик дозволяє оцінити якість алгоритму та порівняти його з аналогічними рішеннями. Найпопулярнішими є метрики IoU, Precision, Recall, mAP50 та mAP50-95 [15]. Значення усіх вказаних метрик може знаходитись в діапазоні 0...1, причому 1 означає ідеальний результат.

IoU (Intersection over Union) є метрикою, що використовується для оцінки перекриття двох областей. У контексті детектування об'єктів, IoU вимірює ступінь перекриття між прогнозованою областю (виявлений об'єкт) та опорною областю (ідеальною або анотованою областю об'єкту).

$$IoU = \frac{\text{Площа перекриття}}{\text{Площа об'єднання}} \quad (2)$$

Precision (P) вимірює, яка частка об'єктів, виявлених алгоритмом, є дійсно коректними. Вона обчислюється як відношення кількості правильно виявлених об'єктів до загальної кількості об'єктів, виявлених алгоритмом. Висока P означає малу кількість неправильно виявлених об'єктів.

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

де TP – кількість правильно виявлених об'єктів; FP – кількість неправильно виявлених об'єктів.

Recall (R) вимірює, яка частка дійсно присутніх об'єктів була виявлена алгоритмом. Вона обчислюється як відношення кількості правильно виявлених об'єктів до загальної кількості дійсно присутніх об'єктів. Висока R означає, що алгоритм виявляє більшу частину об'єктів.

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4)$$

де TP – кількість правильно виявлених об'єктів; FN – кількість пропущених об'єктів.

mAP за порогу в 50 % IoU (mAP50) вимірює якість класифікації виявлених об'єктів. mAP50 означає, що об'єкт вважається правильно виявленим, якщо його перекриття з прогнозованою рамкою (IoU) складає не менше 50 %. Вища mAP50 вказує на кращу точність класифікації об'єктів.

$$mAP50 = \frac{(AP50_1 + AP50_2 + \dots + AP50_N)}{N} \quad (5)$$

де AP – середня Precision по класам.

mAP в діапазоні 50...95 % IoU (mAP50-95) вимірює якість виявлення об'єктів в діапазоні IoU 50...95 %. Вона оцінює здатність алгоритму до стійкого виявлення об'єктів за різних рівнів перекриття. Вища mAP50-95 вказує на кращу стійкість алгоритму до зміни розмірів та орієнтації об'єктів.

$$mAP50-95 = \frac{(AP50-95_1 + AP50-95_2 + \dots + AP50-95_N)}{N} \quad (6)$$

Опис параметрів навчання моделі. Для навчання нейронної мережі використано відкритий набір даних «PCB defects». Початковий набір даних складається з 1386 зображень, які відображають 6 типів дефектів на друкованих платах: відсутній отвір, «укус миші», розрив ланцюга, замикання, шпора та паразитна мідь. Кожен тип дефекту рівномірно представлений в наборі даних, що дозволяє виконувати різноманітні завдання, пов'язані з детектуванням дефектів. Набір даних детально описаний в [5].

Проте початкові зображення з зазначеного набору мають занадто високу роздільну здатність. Тому було вирішено розділити кожне зображення на частини розміром 600×600 пікселів. Кінцевий набір для навчання містить 9920 зображень, тоді як набір для тестування містить 2508 зображень.

Для реалізації нейромережі використовується фреймворк PyTorch, який є одним з найпопулярніших і найпотужніших інструментів для розробки та навчання нейромереж. PyTorch забезпечує гнучкість і простоту в роботі з тензорами, що дозволяє легко будувати, тренувати та валідувати нейромережеву модель.

Тренування моделі YOLOv5s було здійснено з використанням наступних параметрів: розмір вхідного зображення – 416×416, розмір батчу – 16, кількість епох – 300, ваги попередньо навченої моделі – YOLOv5s на наборі MS COCO. Інші гіперпараметри залишено за замовчуванням для базової мережі YOLOv5.

Графіки навчання наведено на рис. 3. Можна зробити висновок, що навчання завершено успішно, ознак перенавчання немає.

Аналіз результатів. Приклади результатів роботи навченої мережі для детектування дефектів на зображеннях із тестового набору показано на рис. 4.

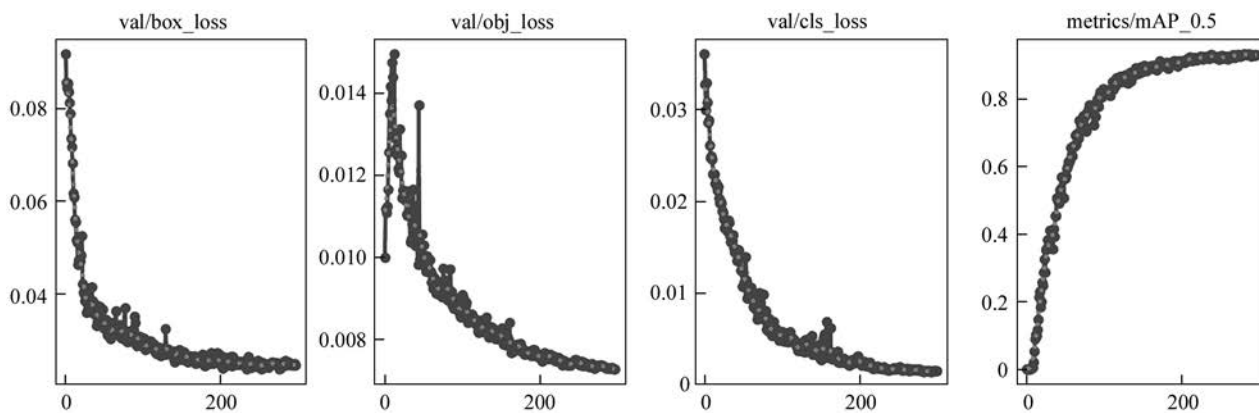


Рис. 3. Графіки процесу навчання

Можна помітити, що мережа здатна успішно виявляти дефекти різних класів і розмірів. У тому числі, успішно розпізнають навіть невеликі за площею дефекти. Оскільки зображення друкованих плат містять багато різноманітних структурних елементів, пошук дефектів вручну зайняв би значний час та потребував би великої уваги та досвіду оператора. Натомість, швидкість опрацювання одного зображення нейронною мережею склала 14,7 мс.

Оцінка роботи нейронної мережі включає також кількісні метрики. Результати кількісної оцінки ефективності моделі на тестовій множині наведено в табл. 2.

Модель YOLOv5s продемонструвала високу ефективність у виявленні об'єктів на зображеннях. Загальна P становить 0,941, що означає, що більшість виявлених об'єктів є правильними. Однак, R має значення 0,894, що свідчить про те, що

деякі об'єкти можуть бути пропущені або недостатньо виявлені.

Серед конкретних класів дефектів пропущений отвір демонструє високі P = 1,000 та R = 0,997, що вказує на ефективну здатність моделі виявляти цей тип дефекту. Схожі показники спостерігаються для класу «коротке замикання» з P = 0,989 і R = 0,969. Ці результати підтверджують ефективність моделі в розпізнаванні цих конкретних класів дефектів.

У той же час, деякі класи, такі як розрив, шпора та надлишкова мідь, показують нижчі значення P та R. Наприклад, розрив має значення P = 0,838 і R = 0,800. Це може вказувати на те, що модель може потребувати додаткового навчання або оптимізації для виявлення цих типів дефектів.

Крім того, метрики mAP50 та mAP50-95 також вказують на загальну достовірність класифі-

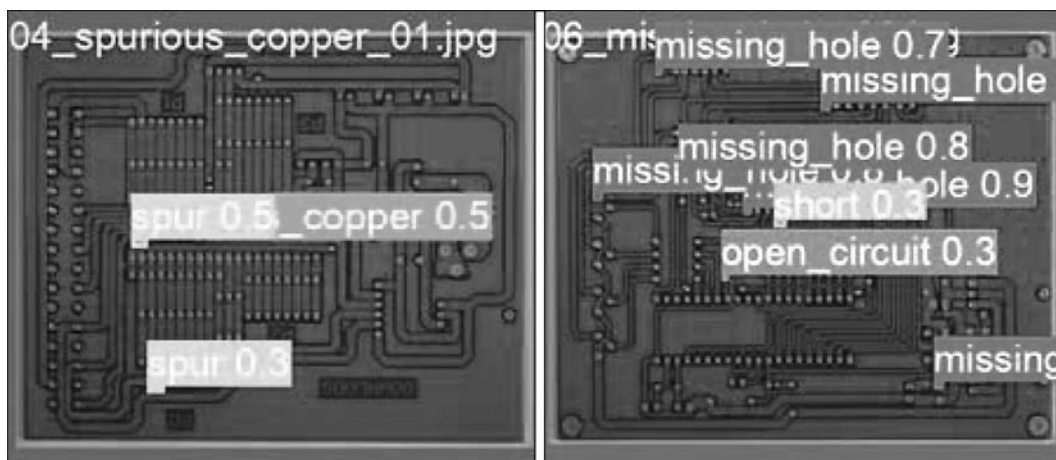


Рис. 4. Приклади детектування різних класів дефектів

Таблиця 2. Результати тестування моделі

Клас дефекту	Кількість зразків	P	R	mAP50	mAP50-95
Всі	596	0,941	0,894	0,925	0,459
Пропуск отвору	105	1,000	0,997	0,995	0,561
«Укус миші»	104	0,894	0,888	0,918	0,450
Розрив	100	0,838	0,800	0,884	0,411
Коротке замикання	90	0,989	0,969	0,981	0,487
Шпора	98	0,953	0,829	0,861	0,424
Надлишкова мідь	99	0,970	0,879	0,910	0,424

кації дефектів. Значення mAP50 становить 0,925, що свідчить про хорошу здатність моделі класифікувати об'єкти при IoU = 50 %. Однак, значення mAP50-95 дорівнює 0,459. Це означає, що в моделі зі збільшенням IoU доля правильних класифікацій знижується.

Враховуючи якісну оцінку, яка показує гарну якість виявлення об'єктів на зображеннях, і кількісну оцінку, що вказує на швидкодію та ефективне використання ресурсів, можна зробити висновок про високу ефективність роботи нейронної мережі YOLOv5s у детектуванні поверхневих дефектів на зображеннях друкованих плат.

На основі наведених даних також можна запропонувати кілька шляхів для подальшого розвитку автоматизованих систем детектування поверхневих дефектів друкованих плат. Першим напрямом є використання потужніших моделей. Варто розглянути можливості використання сучасніших архітектур нейронних мереж, які мають високу точність виявлення об'єктів на стандартних наборах даних, таких як MS COCO. Потенційно ці моделі можуть забезпечити кращу якість детектування та здатність розпізнавання ширшого спектру об'єктів.

Ще одним напрямом для подальших досліджень є аугментація даних. Використання різноманітних методів аугментації дозволить розширити навчальний набір даних і покращити здатність моделі до узагальнення та розпізнавання дефектів у різних умовах зйомки.

Наостанок, важливим завданням є оптимізація гіперпараметрів обраної моделі глибинного навчання. Варто провести додаткові експерименти з дослідження впливу batch size, активаційних функцій, бекбонів та інших параметрів на ефективність детектування дефектів. Це допоможе знайти оптимальні за показником достовірності контролю значення, які забезпечать кращу якість виявлення дефектів і швидкодію моделі.

Вибір конкретних шляхів удосконалення методу автоматизованого детектування поверхневих дефектів друкованих плат повинен залежати від контексту, ресурсів і цілей розробки. На результат впливатимуть умови зйомки, характеристики об'єкту контролю, особливості архітектури моделі глибинного навчання тощо.

Висновки

У роботі проведено детальний аналіз ефективності автоматизованого детектування поверхневих дефектів друкованих плат із використанням нейронної мережі YOLOv5. Існуючі дослідження підтверджують актуальність використання методів штучного інтелекту для автоматизації опрацювання даних візуально-оптичного контролю друкованих плат. Порівняно з попередніми версіями, мо-

дифікація YOLOv5 має підвищену швидкодію та достовірність результатів роботи.

Розглянутий метод автоматизованого виявлення поверхневих дефектів друкованих плат на основі нейронної мережі YOLOv5 показав високу ефективність. Мережа здатна виявляти навіть дрібні дефекти та класифікувати їх з достовірністю mAP50 = 92,5 %. Результати дослідження вказують на потенціал системи для використання в промислових умовах. Потрібно також врахувати, що модель навчалась на зображеннях, які були отримані камерою з роздільною здатністю 8 МП. Мінімальний розмір дефектів, які модель здатна виявити, залежить від великої кількості факторів, таких як умови зйомки, чіткість зображення, масштаб моделі, обрані гіперпараметри моделі тощо.

Розглянута модель YOLOv5s найкраще розпізнає такі критичні дефекти, як пропуск отвору та коротке замикання. Проте важливий дефект типу «розрив» виявляється з нижчою достовірністю. Це можна пояснити візуальною подібністю дефектних розривів і необхідних розривів доріжок, які передбачені дизайном плати. З тих самих причин можуть недостовірно розпізнаватись дефекти типу «надлишкова мідь». З найнижчою достовірністю розрізняється дефект «шпора», однак даний вид дефектів за нормальних експлуатаційних умов не має значного впливу на надійність роботи плати. В цілому, розглянута система лише допомагає автоматизовано виявити дефекти. Кінцеве діагностичне рішення щодо їх критичності та впливу на стабільність роботи плати має прийматись кваліфікованим фахівцем.

Автоматизація візуально-оптичного контролю друкованих плат залишається актуальним напрямом досліджень. Подальший розвиток нових алгоритмів обробки зображень, використання штучного інтелекту та вдосконалення апаратного забезпечення можуть помітно покращити швидкість, точність і надійність процесу контролю. На даний момент також відомі новітні модифікації YOLOv7 та YOLOX, які потребують додаткового вивчення у майбутньому.

Список літератури/References

1. Стещенко Я.В., Момот А.С., Протасов А.Г., Муравйов О.В. (2023) Автоматизація процесу сегментації зображень дефектів металевих поверхонь з використанням нейронної мережі U-Net. *Техн. діагност. та неруйнівн. контроль*, 2, 34–40. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.02.05>
2. Steshenko, Y., Momot A., Protasov A., Muraviov O. (2023) Automation of the process of segmentation of images of metal surface defects using the neural network U-Net. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 2, 34–40. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.02.05>
3. Ling, Q., Isa, N.A. (2023) Printed circuit board defect detection methods based on image processing, machine learning and deep learning: A survey. *IEEE Access*, 11, 15921–15944. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3245093>

3. Khandpur, R.S. (2006) *Printed circuit boards: Design, fabrication, assembly and testing*. New York, McGraw-Hill.
4. Zhou, Y., Yuan M., Zhang J. et al. (2023) Review of vision-based defect detection research and its perspectives for printed circuit board. *J. of Manufacturing Systems*, **70**, 557–578. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.08.019>
5. Akhatova, A. (2021) *PCB defects*, Kaggle. Available at: <https://www.kaggle.com/datasets/akhatova/pcb-defects> (Accessed: 03 March 2024) [in English].
6. Cao, X. (2023) A real-time automated visual inspection system for printed circuit boards missing footprints detection. *Int. J. of Advanced Computer Science and Applications*, **14(5)**. DOI: <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2023.0140537>
7. Zhang, C., Shi W., Li X. et al. (2018) Improved bare PCB defect detection approach based on Deep Feature Learning. *The J. of Engineering*, **16**, 1415–1420. DOI: <https://doi.org/10.1049/joc.2018.8275>
8. Chen, X., Wu Y., He X., Ming W. (2023) A comprehensive review of deep learning-based PCB defect detection. *IEEE Access*, **11**, 139017–139038. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3339561>
9. Adibhatla, V.A., Chih H., Hsu C. et al. (2020) Defect detection in printed circuit boards using you-only-look-once convolutional neural networks. *Electronics*, **9(9)**, 1547. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9091547>
10. Xin, H., Chen, Z., Wang, B. (2021) PCB electronic component defect detection method based on improved Yolov4 algorithm. *J. of Physics: Conference Series*, **1827(1)**, 012167. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1827/1/012167>
11. Redmon, J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. (2015) *You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection*. Computer Vision and Pattern Recognition [Preprint]. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.02640>
12. Zaidi, S.S., Ansari, M., Aslam, A. et al. (2022) A survey of modern deep learning based object detection models. *Digital Signal Processing*, **126**, 103514. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2022.103514>
13. Xu, R., Lin, H., Lu, K. et al. (2021) ‘A forest fire detection system based on Ensemble Learning’. *Forests*, **12(2)**, 217. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12020217>
14. Jiang, P., Ergu, D., Liu, F. et al. (2022) A review of YOLO algorithm developments. *Procedia Computer Science*, **199**, 1066–1073. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.135>
15. Skladchikov, I., Momot, A., Galagan, R. et al. (2022) Application of YOLOX deep learning model for automated object detection on thermograms. *Information extraction and processing*, **50**, 69–77. DOI: <https://doi.org/10.15407/vid-bir2022.50.069>

AUTOMATED DEFECT DETECTION IN PRINTED CIRCUIT BOARDS BASED ON THE YOLOV5 NEURAL NETWORK

A.S. Momot, V.V. Kretsul, O.V. Muraviov, R.M. Galagan

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.
E-mail: drewmomot@gmail.com; asn@kpi.ua

In the paper, we consider the possibilities of applying the YOLOv5s deep learning model to the task of automating the process of detecting surface defects on printed circuit boards. Modern printed circuit boards are manufactured in large volumes and contain a significant number of elements. The manufacturing process of printed circuit boards is complex, which increases the likelihood of board wiring defects, such as short, open circuits, mouse bites, etc. These defects are superficial and can be detected by visual and optical inspection. Compared to other methods, the visual-optical inspection is easier to automate. It is proven that it is promising to use deep learning models to automate the process of detecting objects in images. Modern neural networks can automatically detect surface defects in printed circuit board images with high reliability. The paper considers the YOLO class of models. It is established that the YOLOv5 model has better performance and recognition accuracy than previous modifications. In this study, the YOLOv5s model was implemented and trained to test the effectiveness of this network in the task of automated detection of surface defects on printed circuit boards. The open «PCB Defects» dataset was used for training. A qualitative and quantitative analysis of the performance of the trained network on a test dataset was carried out. It was found that the network can detect surface defects of printed circuit boards with 92.5 % reliability in terms of mAP50. Additionally, the results of the recognition of different classes of defects are analyzed and recommendations for further improvement of the system are given. In particular, it is promising to apply augmentation of training data and use a more complex architecture of the deep learning model. 15 Ref., 2 Tabl., 4 Fig.

Keywords: PCB defects, object detection, deep learning, YOLOv5

Отримано 04.03.2024

Отримано у переглянутому вигляді 26.03.2024

Прийнято 11.06.2024

Вперше в історії людства супутник передав на Землю сонячну енергію з космосу

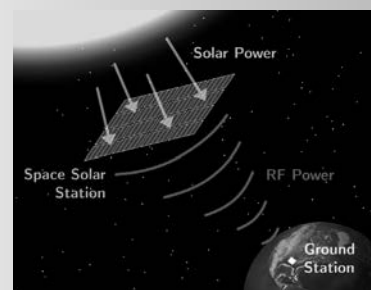
Команда дослідників використовувала пристрій, який представляє невеликий супутник, здатний збирати сонячну енергію за допомогою фотоелектричних елементів і перетворювати її в радіочастотну енергію за допомогою антенних решіток.

Потім супутник синтезував промінь радіочастотної енергії і передав його на Землю, де приймач і перетворювач, розташований на даху лабораторії в Каліфорнійському технологічному інституті, вловив і перетворив сигнал на постійний струм.

Кінцева мета розробників – створення мережі супутників, які зможуть передавати на Землю енергію, достатню для забезпечення 10000 домогосподарств. Однак до цього ще далеко, оскільки поточний експеримент зафіксував лише частину енергії, що генерується супутником.

Космічна сонячна енергетика – це багатообіцяюча концепція, яка має на меті використати неосяжну і безперебійну сонячну енергію, доступну в космосі, і доставити її на Землю, де вона може бути використана для промисловості, домогосподарств та інших цілей.

На відміну від наземних сонячних панелей, на роботу яких впливають погода, пори року та нічний час доби, орбітальні сонячні панелі можуть генерувати енергію безперервно, якщо вони орієнтовані на сонце.



МЕТОДИ РОЗПІЗНАВАННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ДЕФЕКТІВ НА ТОНКОЛИСТОВИХ МАТЕРІАЛАХ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВІЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ (Огляд)

А.С. Новодранов

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: artur19940731@gmail.com

Використання методів розпізнавання поверхневих дефектів з метою автоматизації процесу візуального неруйнівного контролю на виробництвах прокату тонколистових матеріалів стає все актуальнішою задачею. Застосування автоматизованих систем розпізнавання поверхневих дефектів призводить до завчасного виявлення пошкоджень, визначення їх класу та рівня небезпеки. Після класифікації дефекту система без участі оператора приймає рішення про подальші дії. Наявність таких систем запобігає простою обладнання та знижує вплив людського фактора на виробництво. Визначено показники ефективності класифікатора, а також проведено аналіз наявних методів розпізнавання поверхневих дефектів. Визначено переваги та недоліки методів. Проаналізовано доцільність використання методу залежно від типу поверхні та геометричних характеристик дефекту. Визначено доцільність використання декількох методів для забезпечення більшої точності розпізнавання поверхневих дефектів. Відзначено значну перспективність застосування методів машинного навчання на базі нейронних мереж. Перспективність застосування нейронних мереж у системах автоматизованого розпізнавання поверхневих дефектів обумовлена можливістю автоматичного виділення ознак із зображення, а також обробки складних структур. Бібліогр. 32, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: поверхневі дефекти, методи пошуку дефектів, листові матеріали, автоматизований моніторинг, розпізнавання дефектів, обробка зображень

Вступ. Інтенсивний розвиток промисловості ставить завдання підвищення якості продукції. Зважаючи на це, автоматизований моніторинг поверхневих дефектів тонколистових матеріалів має важливе значення в багатьох галузях промисловості [1–4]. Якість тонколистових виробів визначається рядом механічних характеристик і наявністю дефектів залежно від матеріалу, з якого він виготовлений. Наявність дефектів призводить до простою виробничого обладнання через необхідність зупинки формуючої машини, усунення обриву або дефекту, що негативно відображається на продуктивності виробництва. Разом з тим, сучасні комп'ютерні технології та методи штучного інтелекту дозволяють досягти суттєвого ефекту при вдосконаленні систем керування. Виявлення незначних дефектів на ранніх стадіях виробництва може попередити появу браку та забезпечити відповідність продукції стандартам якості. Застосування промислових камер стандарту GigE дає змогу передавати RAW зображення без компресії на сервер зі швидкістю до 5 Гбіт/с для подальшої обробки та аналізу [5]. Використовуючи методи виявлення та розпізнавання поверхневих дефектів на основі статистичних даних, а саме розміру, частоти виявлення та типу дефектів, спектру яскравості або кольору, а також машинного навчання, можливо з високою точністю визначити та класифікувати дефекти за їхнім ступенем небезпеки. Під терміном «точність визначення» слід ро-

зуміти правильність оцінювання наявності дефекту, а саме здатність методу виявляти, чи присутній дефект на отриманому зображенні. При цьому точність класифікації відображає, наскільки вірно метод встановлює клас виявленого дефекту. За результатами класифікації автоматизована система приймає рішення про подальші кроки.

Мета роботи полягає в аналізі та систематизації методів автоматизованого розпізнавання поверхневих дефектів на тонколистових матеріалах для визначення їхніх переваг, недоліків та потенційних областей застосування.

Постановка задачі розпізнавання та класифікації дефектів. Первинною інформацією в задачі розпізнавання та класифікації дефектів виступає двовимірне кольорове зображення поверхні тонколистового матеріалу. Зображення отримуються шляхом сканування поверхні за допомогою системи цифрових CCD камер. Розмір і форма дефектів, типових для відповідного виробництва, можуть значно відрізнятися. У загальному випадку автоматизовані системи моніторингу поверхні тонколистових матеріалів здатні виявляти дефекти від 1...2 мм². Для перевірки якості розпізнавання методів використано збільшене зображення наскрізного дефекту прокату паперового полотна розміром 5,8×30,9 мм. Для виявлення дефектів листових матеріалів за їх цифровими зображеннями обрано поширені методи на базі аналізу статистичних даних, а також визначено методи на основі спектрального аналізу, які є менш поширеними при розв'язанні задач машинного бачення. На протива-

Новодранов А.С. <https://orcid.org/0000-0002-3380-3745>

© А.С. Новодранов, 2024

гу традиційним методам розпізнавання обрано методи на базі машинного навчання.

Показники ефективності класифікатора.

Оцінка результатів застосування методів виявлення поверхневих дефектів відбувається на основі наступних статистичних категорій (рис. 1):

- TP – істинно позитивна, яка вказує, що реальний дефект визначено як дефект;
- TN – істинно негативна, яка вказує, що реальний дефект визначено як фон;
- FP – хибно позитивна, яка вказує, що фон помилково визначено як дефект;
- FN – хибно негативна, яка вказує, що реальний фон вірно визначено як фон.

Категорії TP, FN, TN, FP є загальноприйнятими та широко застосовуються в багатьох галузях науки, включаючи машинне навчання і комп’ютерний зір [7]. Отже, для високого відсотка виявлення поверхневих дефектів необхідно, щоб переважали TP і FN категорії. Якщо серед категорій виявлення переважають TN і FP, необхідно покращувати відповідні пошукові алгоритми та/або методи. На основі вищезазначених категорій можна розрахувати показники ефективності класифікатора:

- Істинно позитивний показник:

$$TPR = \frac{TP}{TP+FN} \tag{1}$$

- Істинно негативний показник:

$$TNR = \frac{TN}{TN+FP} \tag{2}$$

- Хибно позитивний показник:

$$FPR = \frac{FP}{FP+TN} \tag{3}$$

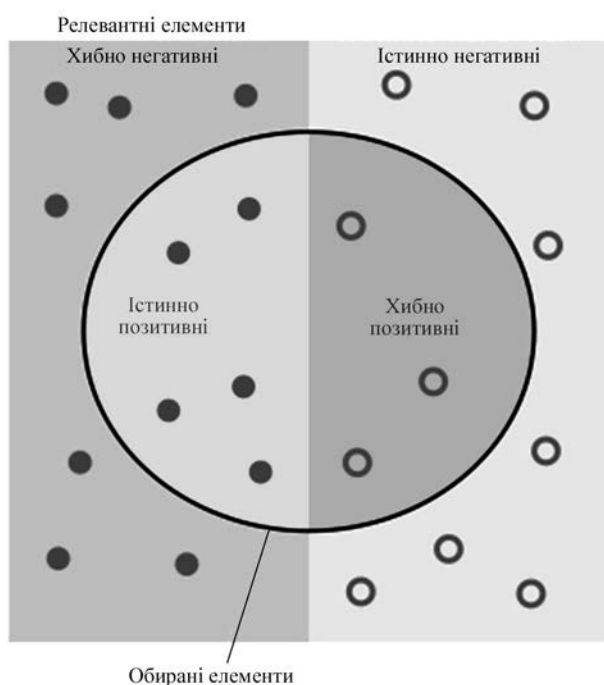


Рис. 1. Матриця невідповідностей [6]

- Хибно негативний показник:

$$FNR = \frac{FN}{FN+TP} \tag{4}$$

- Показник влучності:

$$Precision = \frac{TP}{FP+TP} \tag{5}$$

- Показник повноти:

$$Recall = \frac{TP}{TN+TP} \tag{6}$$

- Показник точності:

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TN+TP+FP+FN} \tag{7}$$

- G-середнє:

$$G_{mean} = \sqrt{TPR \cdot TNR} \tag{8}$$

- F-міра:

$$F_{measure} = \frac{2Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} \tag{9}$$

Серед цих показників особливо слід зазначити G-середнє та F-міру. G-середнє – це величина, що оцінює точність на основі істинно позитивного та істинно негативного показника. F-міра визначає загальну продуктивність процесу виявлення поверхневих дефектів на основі параметрів повноти та влучності. Найбільшим показником F-міри є 1, що вказує на ідеальну влучність і повноту.

Методи розпізнавання поверхневих дефектів. Загальна класифікація методів розпізнавання поверхневих дефектів зображена на рис. 2. Для забезпечення максимально ефективного рівня розпізнавання дефектів доцільно комбінувати зазначені методи та підходи залежно від поставленої задачі та умов виробництва.

1. Статистичні підходи. Застосування статистичних підходів виправдано в тих випадках, коли характер дефектів пов’язаний із текстурою поверхні. Тому виявлення, опис або класифікація ознак на основі текстурних характеристик поверхні, таких як ентропія, контраст, кореляція тощо, є важливим елементом задачі розпізнавання поверхневих дефектів [8].

1.1 Метод виділення країв. Важливим етапом розпізнавання дефектів на RAW зображеннях є метод виділення країв. Існує декілька операторів (рис. 3) для виявлення країв поверхневих дефектів на зображеннях.

Оператор Собеля (Sobel operator) є одним із найпопулярніших. Для виявлення горизонтальних і вертикальних країв він використовує згортку ядра. До переваг даного оператора варто віднести його простоту реалізації, а також невеликий час виконання [9, 10]. Однак слід відзначити шорсткість виділених країв у порівнянні з наступним оператором, а саме Кенні (Canny operator) [11].

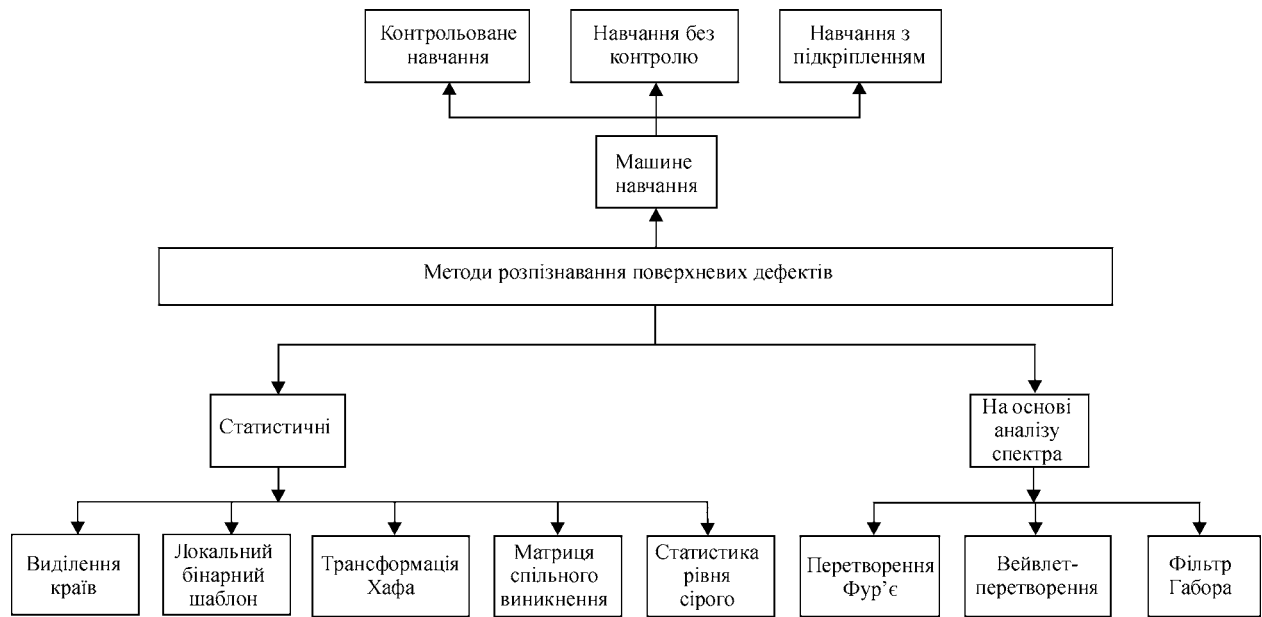


Рис. 2. Класифікація методів розпізнавання поверхневих дефектів

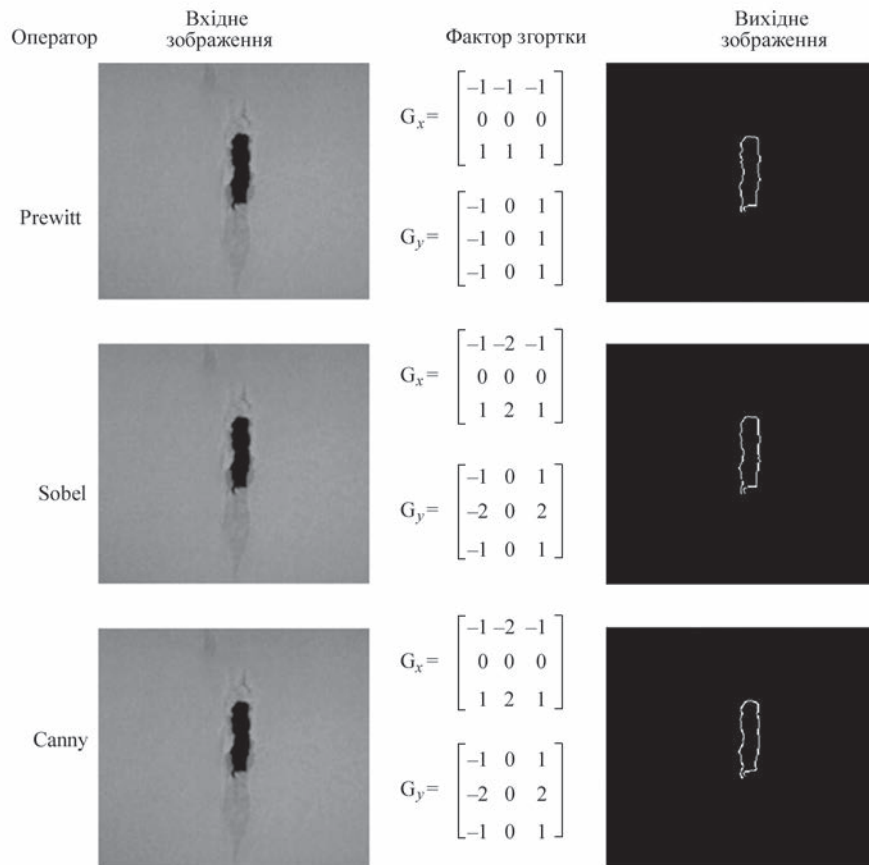


Рис. 3. Результат застосування операторів виділення країв

На першому етапі при його застосуванні виконується згладжування зображення. Далі вираховується градієнт яскравості для кожного пікселя зображення. На наступному етапі застосовується не максимальне придушення та порогове значення для отримання гладкіших країв у порівнянні з оператором Собеля. До недоліків слід віднести складність реалізації, а також більший час виконання. Схожим на оператор Собеля є оператор

Прюїтта (Prewitt operator). Однаковим для цих методів є використання згортки для виявлення змін яскравості на зображеннях. До відмінностей можна віднести різні характеристики ядер, меншу чутливість до зміни інтенсивності, а також меншу величину градієнта оператора Прюїтта [12]. Також інколи застосовують оператор Робертса, який є одним із найпростіших методів виявлення країв, оператор Кірша, а також оператор Лапласа.

Кількісні характеристики якості розпізнавання за допомогою методу виділення країв наведено в таблиці.

1.2 Локальний бінарний шаблон. Застосування методу локального бінарного шаблону (LBP) має найефективніший результат розпізнавання поверхневих дефектів при їх впливі на текстурні характеристики поверхні. Суть метода (рис. 4) полягає у визначенні для кожного пікселя зображення локального навколишнього контексту. На наступному кроці відбувається порівняння параметра яскравості центрального пікселя з яскравістю пікселів обраного контексту. Далі створюється бінарний шаблон для кожного пікселя шляхом встановлення значення «1» у випадку, коли яскравість центрального пікселя менша або дорівнює яскравості поточного, а також встановленням «0» в іншому випадку. Далі для кожної області зображення створюється гістограма LBP кодів. Дана гістограма відображає кількість появ кожного LBP коду у відповідній області [13–15]. Значною перевагою метода LBP є можливість виявляти зміни текстури на зображенні. Також слід зазначити високу швидкість розрахунків.

Кількісні характеристики якості розпізнавання за допомогою методу локального бінарного шаблону наведено в таблиці.

1.3 Трансформація Хафа. Даний статистичний підхід використовується для виявлення прямих ліній, круглих або еліпсоїдальних форм на зображенні. Алгоритм пошуку прямих ліній складається з наступних кроків. На першому кроці кожна точка зображення переноситься у параметричний простір. У такому просторі пряма лінія представлена двома значеннями: кутом нахилу та відстанню до початку координат. На другому кроці для кожної точки зображення будується графік у параметричному просторі. Цей графік буде відображати гіпотетичну пряму, яка проходить через поточну точку. У випадку, коли декілька точок зображення лежать на одній прямій, їх графіки в параметричному просторі перетинаються в одній точці. Програмування такого алгоритму для виділення прямих ліній засновано на аналізі вищенаведених перетинів у параметричному просторі [16, 17]. Для пошуку об'єктів круглої форми на зображенні застосовується тривимірний простір для наведеного алгоритму, в якому об'єкти пошу-

ку будуть представлені координатами центру та радіусом. Щодо виявлення об'єктів еліпсоїдальної форми, то в такому випадку об'єкт пошуку буде представлений координатами центру, віссю еліпса та кутом нахилу.

Кількісні характеристики якості розпізнавання за допомогою методу трансформації Хафа наведено в таблиці.

1.4 Матриця спільного виникнення. Матриця спільного виникнення являє собою структуру даних, яку використовують для оцінки ступеня схожості або збігу між областями або шаблонами зображення в процесі виявлення поверхневих дефектів. При застосуванні даного методу спершу виокремлюються текстурні характеристики, кольорова інформація, форма, розмір та інші атрибути із зображень, які можуть вказувати на поверхневі дефекти. Виділені ознаки порівнюються з ознаками еталонних шаблонів, які створюються заздалегідь на основі інформації про типи дефектів. На наступному кроці створюється матриця для кожної області зображення, кожна комірка якої містить значення порівняння. Далі відбувається аналіз отриманої матриці для виявлення збігу з еталонними шаблонами [18]. На основі аналізу матриці спільного виникнення система може приймати рішення про наявність дефекту та планувати подальші дії.

Кількісні характеристики якості розпізнавання за допомогою матриці спільного виникнення наведено в таблиці.

1.5 Статистика рівня сірого. Застосування статистики рівня сірого виправдано у тому випадку, коли яскравість і контраст зони дефекту відрізняється від області, яка його оточує. Залежно від задачі даний метод можна використовувати як незалежно, так і в комбінації з іншими методами для кращого результату виявлення поверхневих дефектів. Одним із найзастосовуваніших методів є встановлення порогу яскравості. Встановивши порогове значення рівня сірого та виділивши всі пікселі, яскравість яких перевищує це значення, можна виділити вірогідні поверхневі дефекти, яскравість пікселів яких відрізняється від пікселів навколо нього. На наступному кроці аналізуються отримані гістограми для визначення текстурних особливостей зображення. За результатами аналізу можливо визначити текстурні особливості,

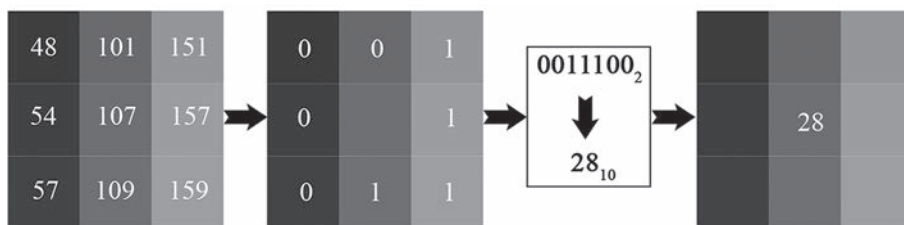


Рис. 4. Принцип роботи методу LBP

які можуть виявитися поверхневими дефектами. Для підвищення вірогідності наявності дефекту за текстурними особливостями поверхні доцільно застосувати один з методів нейронних мереж [19, 20]. Також інколи використовують метод зміни контрасту. Суть цього метода полягає у порівнянні контрасту пікселів вірогідного дефекту та області, що його оточує. Високий рівень контрасту може свідчити про наявність поверхневого дефекту. Кількісні характеристики якості розпізнавання за допомогою методу статистики рівня сірого наведено в таблиці.

До недоліків статистичних методів можна віднести ненадійність у випадку зміни освітленості, а також інтерференції псевдоефектів.

2. Методи, що ґрунтуються на основі аналізу спектра. Дані методи застосовуються для виявлення та аналізу частотних характеристик текстурних особливостей поверхневих дефектів тонколистових матеріалів.

2.1 Перетворення Фур'є. Для аналізу частотних характеристик текстур і деталей на зображеннях поверхневих дефектів часто застосовується перетворення Фур'є. Суть методу полягає в переході від просторового представлення зображення до частотного. Дане перетворення дозволяє аналізувати зображення в частотній області, а також виділяти основні частоти в зображенні, що буде корисним при виділенні країв і текстур. У результаті даного перетворення отримується спектр зображення у вигляді двовимірної матриці, яка містить в собі інформацію про частотні компоненти та їх фазово-частотну характеристику. На наступному кроці відбувається виділення та розпізнавання дефектів на зображенні шляхом аналізу частотних характеристик спектра. Внаслідок того, що дефекти можуть змінювати частотний склад вхідного зображення, тобто містити високочастотні компоненти або шум, тим самим забезпечується видимість вірогідних дефектів у спектрі. Застосування даного перетворення дає змогу виділити дефекти або зміни структури за допомогою придушення небажаних компонентів або підсилення необхідних частот. Після аналізу частотних характеристик можливо повернутися до просторового представлення зображення за допомогою оберненого перетворення Фур'є. На наступному кроці застосовується метод порогової фільтрації для виділення та методи класифікації для визначення типу дефекту [21, 22]. До недоліку методу перетворення Фур'є слід віднести неможливість опису просторової моделі інформаційного сигналу, через що більшість інформації локального опису ігнорується.

Кількісні характеристики якості розпізнавання за допомогою методу перетворення Фур'є наведено в таблиці.

2.2 Вейвлет-перетворення. Даний метод аналізу зображень є досить потужним, а тому часто застосовується для розпізнавання поверхневих дефектів тонколистових матеріалів. Суть методу полягає у розкладі вхідного зображення за масштабами та орієнтаціями за допомогою вейвлет-перетворення. Результатом перетворення виступають вейвлет-коефіцієнти, які представлені у вигляді масштабів та орієнтацій деталей вхідного зображення. Для виділення необхідних дефектів на зображенні треба застосувати фільтрацію відповідних коефіцієнтів. На наступному кроці виконується обернене вейвлет-перетворення для трансформації зображення в піксельну систему координат. Результатом оберненого перетворення є зображення із виділеними поверхневими дефектами. У випадку недостатньої інтенсивності виділених дефектів доцільно застосувати метод порогової фільтрації. Завершальним кроком є застосування алгоритмів класифікації для визначення типу та рівня небезпеки розпізнаного дефекту. За допомогою даного методу можливо розпізнавати дефекти різного розміру шляхом аналізу текстурних особливостей, а також локалізації дефектів різної просторової частоти. До недоліків методу слід віднести чутливість при обранні вейвлетів і параметрів розкладу [23, 24]. Кількісні характеристики якості розпізнавання за допомогою вейвлет-перетворення наведено в таблиці.

2.3 Фільтр Габора. Даний метод ефективніше описує просторову модель інформаційного сигналу, у порівнянні із методом перетворення Фур'є, шляхом модулювання функції ядра Гауса синусоїдальною хвилею певної частоти. Іншими словами, фільтр Габора – це математичний фільтр, який використовують для аналізу структурних і текстурних поверхневих дефектів. Суть методу полягає у визначенні параметрів фільтра, таких як частота, орієнтація та розмір. На основі цих параметрів створюється ядро фільтра, що являє собою двовимірну функцію вигляду синусоїдальної хвилі, обмеженої функцією Гауса. За допомогою оператора згортки отримане ядро функції застосовується до зображення. Таке застосування допомагає виявити текстурні та структурні особливості за допомогою підсилення текстурних деталей у зображенні, які відповідають частотним параметрам фільтра. У результаті застосування фільтра Габора створюється карта реакцій, яка відображає ступінь відповідності текстурних особливостей кожного пікселя зображення. Великі значення на цій карті можуть означати наявність поверхневого дефекту. Карта реакцій надалі опрацьовується за допомогою методу порогової фільтрації для виділення областей дефекту [25, 26]. До недоліків методу слід віднести його неортогональність, внас-

лідок чого існує надлишок компонентів ознак, що призводить до зниження ефективності аналізу текстурних зображень. Кількісні характеристики якості розпізнавання за допомогою фільтра Габо-ра наведено в таблиці.

3. Підходи на основі машинного навчання.

Машинне навчання – це набір алгоритмів і методів штучного інтелекту (ШІ), за допомогою яких комп’ютер проходить процес самонавчання без прямих інструкцій. До основних методів машинного навчання слід віднести:

- контрольоване навчання або навчання із вчителем;
- навчання без контролю;
- навчання з підкріпленням.

Найзастосовуванішим алгоритмом машинного навчання є штучна нейронна мережа. Застосування нейронної мережі потребує великого обсягу даних (datasets) для навчання. У якості навчальних даних виступають набори зображень із необхідним типом дефектів і без них. Необхідний набір зображень з дефектами обирається в залежності від поверхні матеріалу, на якій буде проводитись розпізнавання. Типовими дефектами для паперово-картонного виробництва вважаються обрив полотна, зминання та дефекти країв полотна, блукаюча тріщина та ін. На противагу паперово-картонному виробництву, типовими дефектами для металопрокатних виробництв є подряпини, корозія та іржа, відлущування, сліди обробки та ін.

Нейронна мережа в загальному випадку (рис. 5) складається з вхідного шару, відповідального за нормалізацію даних, певної кількості прихованих шарів, які виконують обчислювальні функції, а також вихідного шару.

Методи навчання нейронної мережі поділяються на методи прямого та зворотного розповсюдження помилки. Під час прямого розпов-

сюдження помилки відбувається безпосереднє передбачення відповіді. При зворотному розповсюдженні помилки відбувається мінімізація похибки між відповіддю та передбаченням.

3.1 Контрольоване навчання. Суть метода полягає у навчанні моделі з вчителем на базі розмічених даних, а саме зразків, які мають відому мітку або клас. Контрольоване машинне навчання використовується для навчання моделі класифікатора поверхневих дефектів. На першому кроці створюється база даних із зображеннями ділянок виробу з типовими дефектами із зазначенням їх типу та координат (x, y) зони дефекту. На другому кроці здійснюється відбір із зображень характерних ознак, які можуть бути використані для класифікації дефектів. До характерних ознак належать геометричні або текстурні особливості та ін. Далі обирається відповідна модель машинного навчання, а саме CNN, SVM, RF або інша. Після цього починається процес навчання моделі на розмічених даних із використанням вилучених характерних особливостей дефектів. Під час навчання модель нейронної мережі налаштовується на характеристики зображення, які відповідають різноманітним класам дефектів. Після завершення процесу навчання перевіряється оцінка точності розпізнавання за допомогою набору тестових даних. У разі недостатньої точності проводиться повторне навчання на іншому наборі даних, поки не буде досягнута необхідна точність. До недоліків метода можна віднести необхідність великого обсягу якісно розмічених даних для навчання. До переваг слід віднести високу точність при правильному налаштуванні та навчанні [28, 29].

Слід зазначити, що для розв’язання задач комп’ютерного зору найкраще підходять згорткові нейронні мережі (CNN) внаслідок спеціалізованої архітектури (рис. 6), масштабованості, а також інваріантності до зміщень і спотворень. За допомогою загорткових шарів відбувається автоматичне виділення ознак для виявлення дефектів. Наступним кроком застосовуються шари субдискретизації для зменшення розмірності даних. Для розв’язання задачі класифікації застосовують повнозв’язкові шари.

Обравши модель нейронної мережі YOLOv4 та провівши навчання на тестовій вибірці зображень, яка містила типові дефекти паперового полотна, вдалося досягти наступного результату (рис. 7). Навчальна вибірка розмічених даних складала 80 зображень. Тестова та валідаційна вибірки містили по 10 зображень кожна. Наявність тестової та валідаційної вибірки обумовлені необхідністю перевірки адекватності процесу навчання.

Кількісні характеристики якості розпізнавання за допомогою метода контрольованого навчання наведено в таблиці.

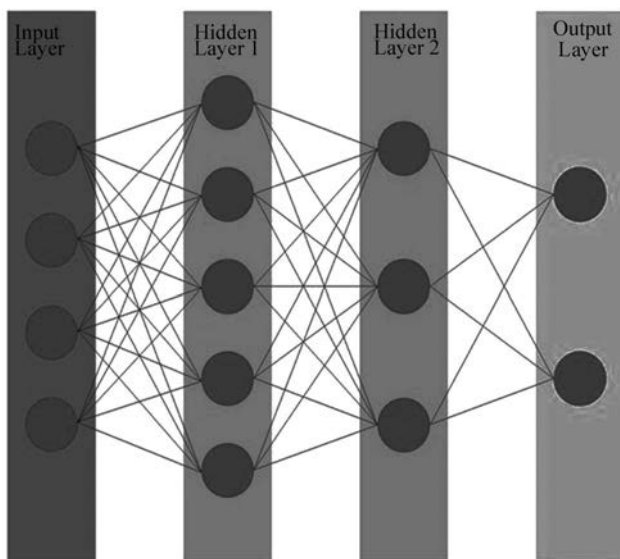


Рис. 5. Загальна структура нейронної мережі [27]

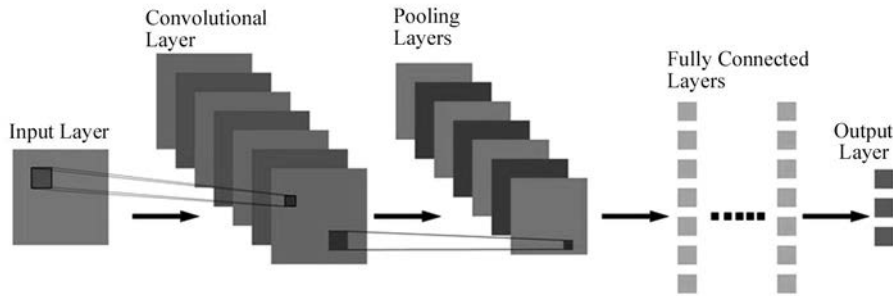


Рис. 6. Типова архітектура CNN мережі [27]

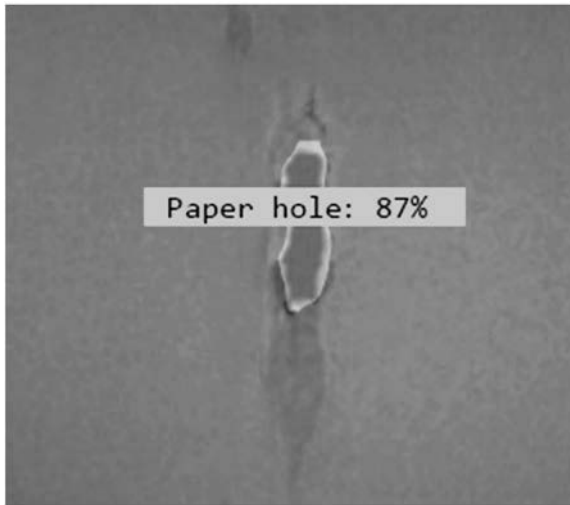


Рис. 7. Результат виявлення та класифікації дефекту за допомогою методу контрольованого навчання

3.2 Навчання без контролю. Даний метод машинного навчання в якості вхідних даних приймає не розмічені дані. Під час навчання модель сама повинна знаходити закономірності або шаблони без інформації про класи можливих дефектів. Принцип кластеризації полягає у прагненні моделі самостійно згрупувати зображення за схожими ознаками без визначених класів. Принцип зниження розмірності полягає у збереженні якомога більшої кількості інформації при зменшенні розмірності даних. Застосування методу навчання

Значення метрик оцінки якості розпізнавання розглянутих методів

Номер	Метод	F-міра	Показник точності, %	Показник влучності, %	Показник повноти, %	Час виконання, мс
1	Виділення країв					
	Оператор Кенні	0,96	93,00	96,79	95,44	8,57
	Оператор Прюїтта	0,92	92,34	92,34	90,83	4,12
	Оператор Собеля	0,86	81,00	85,41	86,67	5,36
2	Локальний бінарний шаблон	0,83	82,00	84,51	81,70	21,41
3	Трансформація Хафа	0,78	72,00	75,57	80,18	27,49
4	Матриця спільного виникнення	0,74	73,00	73,46	74,71	24,85
5	Статистика рівня сірого	0,69	66,00	69,26	69,26	11,51
6	Перетворення Фур'є	0,65	63,00	65,77	64,72	36,21
7	Вейвлет-перетворення	0,85	82,00	88,85	80,69	67,32
8	Фільтр Габора	0,85	81,00	84,14	85,44	81,92
9	Контрольоване навчання	0,94	93,00	95,00	93,58	12,38*

Примітка. *Час виконання без урахування часу для навчання нейронної мережі.

без контролю дає змогу виявляти скриті шаблони або характеристики для подальшого аналізу або кластеризації даних, знаходження аномалій або асоціацій. Але існує складність визначення точності виявлення внаслідок відсутності «правильних» відповідей [30].

3.3 Навчання з підкріпленням. Даний метод машинного навчання полягає у взаємодії агента із навколишнім середовищем. В якості агента виступає нейронна мережа, яка приймає рішення на основі вхідних даних. За прийняті рішення агент отримує позитивну або негативну оцінку. Головною задачею агента є максимізація отримання позитивних оцінок під час навчання та обрання оптимальної стратегії взаємодії. Процес навчання нейронної мережі з підкріпленням базується на ітеративній взаємодії агента із середовищем, з яким він контактує. Таким чином, агент навчається на своїх діях, а також накопиченому досвіду взаємодії із навколишнім середовищем. Даний метод максимально підходить для навчання роботів і автономних систем управління безпілотними транспортними засобами [31, 32].

Слід зазначити, що отримано незадовільні метрики оцінки якості розпізнавання за допомогою методів машинного навчання, а саме, навчання без контролю та навчання з підкріпленням, через складність архітектури і, як наслідок, складного налаштування. У свою чергу варто зазначити, що

метод контрольованого навчання показав високий результат якості розпізнавання. Однак параметр «впевненості» (рис. 7) виявився на рівні 87 %, що можна пояснити недостатньо великим набором навчальних даних. Кожен із наведених вище методів машинного навчання можна використовувати разом для ефективнішого процесу навчання на обмеженому наборі вхідних даних.

Кількісні характеристики якості розпізнавання дефектів на цифрових зображеннях за допомогою розглянутих методів наведено у таблиці.

Висновки

За результатами аналізу методів розпізнавання поверхневих дефектів можна зробити висновок, що методи машинного навчання, а саме загорткових нейронних мереж найкраще підходять для застосування в автоматизованих системах контролю якості виготовлення тонколистових матеріалів. Застосування методів машинного навчання є перспективним внаслідок автоматичного відділення ознак із зображення, а також можливості обробки складних структур даних. До недоліків даних методів слід віднести необхідність великого обсягу даних для навчання. Але правильно налаштована нейронна мережа на висхідному масиві даних для навчання буде тільки підвищувати точність розпізнавання. Розглянуті методи статистичного підходу, а також методи, що ґрунтуються на аналізі спектра, доцільно використовувати у поєднанні з іншими методами для досягнення більшої точності розпізнавання. Застосування методів виявлення країв, статистики рівня сірого, локального бінарного шаблону та ін. у деяких випадках раціонально використовувати як попередню обробку для формування бази навчальних даних для методів машинного навчання. Також визначено випадки та обставини, у яких застосування того чи іншого метода доцільніше через низку причин. Наприклад, визначено, що метод трансформації Хафа показує найвищу ефективність при розпізнаванні геометричних фігур на зображеннях, таких як лінії, кола та еліпси.

Список літератури/References

1. Lv, X., Duan, F., Jiang, J., Fu, X., Gan, L. (2020) Deep metallic surface defect detection: The new benchmark and detection network. *Sensors*, **20**, 1562. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20061562>
2. Lv, X., Duan, F., Jiang, J., Fu, X., Gan, L. (2020) Deep active learning for surface defect detection. *Sensors*, **20**, 1650. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20061650>
3. Ghorai, S., Mukherjee, A., Gangadaran, M., Dutta, P.K. (2013) Automatic defect detection on hot-rolled flat steel products. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **62**, 612–621. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2012.2218677>
4. Song, K., Yan, Y. (2013) A noise robust method based on completed local binary patterns for hot-rolled steel strip surface defects. *Appl. Surf. Sci.*, **285**, 858–864. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.09.002>
5. Luo, Q., He, Y. (2016) A cost-effective and automatic surface defect inspection system for hot-rolled flat steel. *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, **38**, 16–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.09.008>
6. Medium https://miro.medium.com/v2/resize:fit:640/format:webp/1*GDR0plA0fmHHbk9IZoGPBg.png
7. Alaa Tharwat (2020) Classification assessment methods. *Applied Computing and Informatics*, **17**, 168–192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aci.2018.08.003>
8. Xuewu, Z., Fang, G., Lizhong, X. (2012) Inspection of surface defects in copper strip using multivariate statistical approach and SVM. *Int. J. Comput. Appl. Technol.*, **43**, 44–50. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2012.045840>
9. Shi, T., Kong, J., Wang, X., Liu, Z., Zheng, G. (2016) Improved sobel algorithm for defect detection of rail surfaces with enhanced efficiency and accuracy. *J. Cent. South. Univ.*, **23**, 2867–2875. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-016-3350-3>
10. Borselli, A., Colla, V., Vannucci, M., Veroli, M. (2010) A fuzzy inference system applied to defect detection in flat steel production. In: *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, Barcelona, Spain*, 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/FUZZY.2010.5584036>
11. Shen, Y. (2010) Techniques of machine vision applied in detection of copper strip surface's defects. *Electron. Meas. Technol.*, **33**, 65–67. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-15621-2_34
12. Huang, X., Luo, X. (2014) A real-time algorithm for aluminum surface defect extraction on non-uniform image from CCD camera. In: *Proc. of the Int. Conf. on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC), Lanzhou, China*, 556–561. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMLC.2014.7009668>
13. Ojala, T., Pietikainen, M., Harwood, D. (1996) A comparative study of texture measures with classification based on feature distributions. *Pattern Recognit.*, **29**, 51–59. DOI: [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(95\)00067-4](https://doi.org/10.1016/0031-3203(95)00067-4)
14. Song, K.C., Yan, Y.H., Chen, W.H., Zhang, X. (2013) Research and perspective on local binary pattern. *Acta Automatica Sinica*, **39**, 730–744. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1874-1029\(13\)60051-8](https://doi.org/10.1016/S1874-1029(13)60051-8)
15. Liao, S., Zhu, X., Lei, Z., Zhang, L., Li, S.Z. (2007) Learning multi-scale block local binary patterns for face recognition. In: *Proc. of the Int. Conf. on Biometrics, Seoul, Korea*, 828–836. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-74549-5_87
16. Sharifzadeh, M., Alirezaee, S., Amirfatahi, R., Sadri, S. (2008) Detection of steel defect using the image processing algorithms. In: *Proc. of the Inmic: Int. Multitopic Conf., 12th IEEE Int. Multitopic Conf., Karachi, Pakistan*, 125–127. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/INMIC.2008.4777721>
17. Bulnes, F.G., Garcia, D.F., Javier de la Calle, F., Usamentiga, R., Molleda, J. (2016) A non-invasive technique for on-line defect detection on steel strip surfaces. *J. Nondestruct. Eval.*, **35**, 1–18. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10921-016-0370-8>
18. Tsai, D.-M., Chen, M.-C., Li, W.-C., Chiu, W.-Y. (2012) A fast regularity measure for surface defect detection. *Mach. Vis. Appl.*, **23**, 869–886. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00138-011-0403-3>
19. Choi, J., Kim, C. (2012) Unsupervised detection of surface defects: A two-step approach. In: *Proc. of the 19th IEEE Int. Conf. on Image Processing (ICIP), Lake Buena Vista, FL, USA*, 1037–1040. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIP.2012.6467040>
20. Djukic, D., Spuzic, S. (2007) Statistical discriminator of surface defects on hot rolled steel. *Proc. of Image and Vision Computing New Zealand 2007*, 158–163.
21. Ai, Y., Xu, K. (2013) Surface detection of continuous casting slabs based on curvelet transform and kernel locality preserving projections. *J. Iron Steel Res. Int.*, **20**, 80–86. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(13\)60102-8](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60102-8)
22. Paulraj, M.P., Shukry, A.M.M., Yaacob, S., Adom, A.H., Krishnan, R.P. (2010) Structural steel plate damage detection using DFT spectral energy and artificial neural network. In: *Proc. of the 6th Int. Colloquium on Signal Processing & its Applications, Mallaca City, Malaysia*, 1–6. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/CSPA.2010.5545247>

23. Wu, X., Xu, K., Xu, J. (2008) Application of undecimated wavelet transform to surface defect detection of hot rolled steel plates. In: *Proc. of the 1st Int. Congress on Image and Signal Processing, Sanya, China*, 528–532. DOI: <https://doi.org/10.1109/CISP.2008.278>
24. Li, X., Tso, S.K., Guan, X., Huang, Q. (2006) Improving automatic detection of defects in castings by applying wavelet technique. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **53**, 1927–1934. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2006.885448>
25. Choi, D.C., Jeon, Y.J., Yun, J.P., Kim, S.W. (2011) Pinhole detection in steel slab images using Gabor filter and morphological features. *Appl. Opt.*, **50**, 5122–5129. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.50.005122>
26. Chol, D.C., Jeon, Y.J., Kim, S.H., Moon, S., Yun, J.P., Kim, S.W. (2017) Detection of pinholes in steel slabs using gabor filter combination and morphological features. *ISIJ Int.*, **57**, 1045–1053. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-160>
27. Amirhossein Yazdani Abyaneh, Ali Hosein Gharari Foumani, Vahid Pourahmadi (2018) *Deep Neural Networks Meet CSI-Based Authentication*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.04715>
28. Kang, G.W., Liu, H.B. (2005) Surface defects inspection of cold rolled strips based on neural network. In: *Proc. of the 4th Int. Conf. Machine Learning Cybernetics, Canton, China*, 5034–5037. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMLC.2005.1527830>
29. Chen, F., Jahanshahi, M.R. (2018) NB-CNN: Deep learning-based crack detection using convolutional neural network and naive bayes data fusion. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **65**, 4392–4400. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2764844>
30. Bulnes, F.G., Usamentiaga, R., Garcia, D.F., Molleda, J. (2012) Vision-based sensor for early detection of periodical defects in web materials. *Sensors*, **12**, 10788–10809. DOI: <https://doi.org/10.3390/s120810788>
31. James Lindsay, Sidney Gigivi (2020) A Novel way of Training a Neural Network with Reinforcement Learning and without Back Propagation. In: *2020 Int. Joint Conf. on Neural Networks (IJCNN)*. DOI: <https://doi.org/10.1109/IJCNN48605.2020.9207659>
32. Seyed Sajad Mousavi, Michael Schukat, Enda Howley (2017) Deep Reinforcement Learning: An Overview. In: *Proc. of SAI Intelligent Systems Conf.*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1701.07274>

METHODS FOR DETECTING SURFACE DEFECTS ON THIN SHEET MATERIALS FOR VISUAL CONTROL AUTOMATION (REVIEW)

A.S. Novodranov

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: artur19940731@gmail.com

The use of methods for recognizing surface defects in order to automate the process of visual non-destructive control in production of rolled thin-sheet materials is becoming an increasingly urgent task. The use of automated systems for recognizing surface defects leads to early detection of damage and determination of their class and level of danger. After classifying the defect, the system makes a decision on further actions without the operator participation. Presence of such systems prevents equipment downtime and reduces the impact of the human factor on production. The classifier performance metrics was determined and analysis of the current techniques for identifying surface flaws was performed. The advantages and disadvantages of the methods are determined. The feasibility of using the method was analyzed depending on the type of surface and geometric characteristics of the defect. The expediency of using several methods to ensure more accurate recognition of surface defects is determined. Significant prospects for the application of machine learning methods based on neural networks are noted. The prospect of using neural networks in systems for automated recognition of surface defects is due to the possibility of automatic selection of features from the image, as well as processing of complex structures. 32 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

Keywords: surface defects, defect detection methods, sheet materials, automated monitoring, defect recognition, image processing

Отримано 26.03.2024

Отримано у переглянутому вигляді 25.04.2024

Прийнято 30.05.2024

ПЕРЕДБАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПЛАВЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

Костя Траченко, який здобув ступінь доктора наук у Кембриджському університеті та магістра у Львівському, розробив нову теорію, яка вирішує давню проблему фізики — передбачення температури плавлення матеріалів. Його дослідження, опубліковане в журналі *Physical Review E*, є значущим кроком у розумінні фундаментальних властивостей матерії і фазових переходів. Протягом десятиліть учені стикалися з проблемою відсутності універсального опису лінії плавлення на фазових діаграмах температура-тиск. Але тепер теорія професора



Траченка, заснована на останніх досягненнях у теорії рідин, пропонує просте параболічне рівняння для опису цієї лінії. Це означає, що температуру плавлення можна передбачити з використанням фундаментальних фізичних констант. «Простота й універсальність цього результату особливо цікаві», — пояснює професор Траченко. «Це передбачає, що плавлення, незважаючи на його складність, демонструє фундаментальну єдність різних систем, від благородних газів до металів». Робота Траченка отримала 10 найкращих нагород за прорив у фізиці та премію EPSRC-CCP за «видатний внесок у теорію і моделювання фаз конденсованої речовини, включно з теорією рідкого стану».

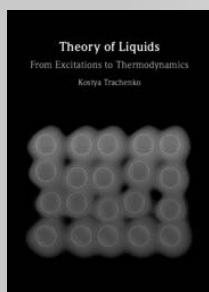
Теорія рідин, пропонує просте параболічне рівняння для опису цієї лінії. Це означає, що температуру плавлення можна передбачити з використанням фундаментальних фізичних констант. «Простота й універсальність цього результату особливо цікаві», — пояснює професор Траченко. «Це передбачає, що плавлення, незважаючи на його складність, демонструє фундаментальну єдність різних систем, від благородних газів до металів». Робота Траченка отримала 10 найкращих нагород за прорив у фізиці та премію EPSRC-CCP за «видатний внесок у теорію і моделювання фаз конденсованої речовини, включно з теорією рідкого стану».

Theory of Liquids. From Excitations to Thermodynamics

Kostya Trachenko

Queen Mary University of London

2023, 300 стор., ISBN: 9781009355476



ВИЯВЛЕННЯ ВТОМНИХ ТРІЩИН У ЗОНІ ГАЛТЕЛЬНИХ ПЕРЕХОДІВ СТАЛЕВИХ ЛОПАТОК ПРОМИСЛОВИХ ГАЗОВИХ ТУРБІН ВИХРОСТРУМОВИМ МЕТОДОМ

В.М. Учанін¹, Д. Нардоні², П. Нардоні²

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова 5. E-mail: vuchanin@gmail.com

²I&T Nardoni Institute. Фольцано, Брешия, Італія. E-mail: nardoni.campus@gmail.com

Розглянуто результати експериментальних досліджень, метою яких є створення ефективної технології вихрострумової дефектоскопії критичної зони галтельних переходів лопаток газових турбін із феромагнітних сталей. Запропоновану технологію контролю реалізовано з використанням селективних вихрострумових перетворювачів (ВСП) подвійного диференціювання, які забезпечують високу чутливість під час контролю за умови зміни зазору між робочою поверхнею ВСП і поверхнею лопатки в галтельній зоні. Проведені дослідження сигналів ВСП типу МДФ 0501 (діаметр робочої поверхні – 5 мм) дозволили мінімізувати вплив завад вибором оптимальної робочої частоти та обрати оптимальну траєкторію сканування контрольованої зони. Ефективність запропонованої технології контролю підтверджено на реальній лопатці газової турбіни зі штучним дефектом завдовжки 2 мм і завглибшки 0,2 мм, що характеризує заданий технічним завданням поріг чутливості. Технологію контролю також успішно використано під час її випробувань на підприємствах енергетичної галузі. Бібліогр. 20, рис. 9.

Ключові слова: лопатка газової турбіни, галтельний перехід, вихрострумовий перетворювач, робоча частота

Вступ. Газовою турбіною називають лопаткову машину, у якій потенційна енергія стиснутого та/або нагрітого газу перетворюється у механічну роботу на валу. Її основними елементами є ротор із закріпленими на дисках робочими лопатками та статор. Конструкція лопатки складається з пера, бандажної полки та хвостовика. Перо лопатки являє собою металеву профільовану лопать, що безпосередньо контактує з робочим газом. Полкою називають кінцеву ділянку пера, призначену для зниження вібрації та захисту ободу диска від дії розігрітого газу. Хвостовик слугує для кріплення лопатки в пазу диска. Лопатки є найвідповідальнішими деталями турбін, що працюють за умов циклічних і термічних навантажень у поєднанні з процесами корозії та ерозії під дією розігрітого робочого газу. Газові турбіни та їх елементи є предметом постійного вдосконалення [1, 2]. Найжорсткіші вимоги щодо якості, надійності та довговічності пред'являють до лопаток газових турбін, тому що багато серйозних інцидентів під час експлуатації газових турбін пов'язано з їх руйнуванням. Особливу увагу через критичну концентрацію напружень дослідники приділяють зоні галтельних переходів, де має місце близьке до прямокутного спряження профільного пера з поверхнею полки лопатки (рис. 1) [3]. Фрактографічні дослідження показали, що основною причиною руйнування лопатки газової турбіни є багатоциклова втома [4, 5]. Первинна тріщина

на може виникнути через великі включення іншої фази [3] або корозійні явища [5, 6]. Руйнування та відрив фрагментів роторної лопатки під час роботи може бути причиною серйознішої аварії через значні пошкодження інших вузлів турбіни. Велике значення має також економічний аспект, пов'язаний з високою вартістю виготовлення лопаткового вузла, яка може досягати 35 % вартості турбіни в цілому.

Гарантією безпечної експлуатації газових турбін є своєчасне виявлення експлуатаційних дефектів засобами неруйнівного контролю (НК). Тому розробка ефективних методів НК лопаток газових турбін є актуальною задачею сучасної техніки.

Стан проблеми. Періодичний НК лопаток та інших вузлів газових турбін у процесі експлуатації є важливим для безпечної експлуатації за рахунок своєчасного виявлення дефектів до повного руйнування конструкції. НК необхідно проводити швидко та ефективно, щоб звести до мінімуму час простою турбіни. Існує багато методів НК, які можна застосувати для перевірки компонент газових турбін [6–8]. Метод проникаючих рідин (кольоровий метод) з використанням барвника є недорогою та простою у виконанні технологією НК, яка часто використовується для НК компонентів газових турбін. Недоліками методу є високі вимоги до якості очищення поверхні та обмеження під час НК кородованих поверхонь. Іншим обмеженням даного методу є його придатність для ви-

В.М. Учанін – <http://orcid.org/0000-0001-9664-2101>

© В.М. Учанін, Д. Нардоні, П. Нардоні, 2024

явлення лише відкритих тріщин. Тому цей метод неможливо використовувати для НК лопаток із захисними покриттями. Магнітопорошковий метод дозволяє виявляти тріщини у лопатках із феромагнітних сталей і є відносно низьковитратним. Але він має ті ж обмеження, що й метод проникаючих рідин. Ультразвуковий метод може бути використаний для НК лопаток [8]. Але й тут є недоліки, пов'язані з необхідністю використання контактних рідин, що суттєво ускладнює НК у реальних виробничих умовах енергетики.

Враховуючи вищесказане, з нашої точки зору найпридатнішим методом НК лопаток газових турбін в умовах експлуатації є вихрострумний метод НК [9–12]. Але й під час спроб застосувати вихрострумний НК лопаток виникають виклики, пов'язані, зокрема, зі: 1) складною формою лопатки; 2) наявністю зазорів між ВСП під час контролю увігнутих зон; 3) підвищеним рівнем завад, характерних для вихрострумного НК виробів із феромагнітних сталей через магнітну неоднорідність матеріалу.

Найважливіше під час розробки технології вихрострумного НК лопаток – враховувати складну форму лопатки (рис. 1) з вигнутими опуклими та увігнутими поверхнями, крайовими і галтельними зонами, які, зазвичай, виділяють в окремі зони контролю, дефектоскопію яких проводять після відповідного налаштування з урахуванням особливостей цієї зони.

Вихрострумний НК зон з великим радіусом кривизни на віддалі від краю не викликає великого занепокоєння та вимагає тільки виготовлення



Рис. 1. Типова лопатка компресора газової турбіни з електроерозійним прорізом завдовжки 4 мм, завглибшки 0,2 мм і розкриттям 0,1 мм у зоні галтельного переходу для налаштування та перевірки технології контролю

спеціальних насадок для орієнтації ВСП перпендикулярно контрольованій поверхні. Проблему вихрострумного НК крайових зон також можна вирішити шляхом використання відповідних насадок, які дозволяють сканування крайової зони на постійній відстані від краю лопатки. Під час розробки методики контролю лопаток крайову зону необхідно виділити в окрему зону, для контролю якої необхідно провести балансування ВСП, встановлюючи його на певній відстані від краю з відповідним налаштуванням вихрострумного дефектоскопа (ВД). Суттєві проблеми виникають під час контролю галтельних переходів між полкою та пером лопатки, де під час експлуатації найчастіше утворюються втомні тріщини, які орієнтовані переважно вздовж галтельного переходу. Ці обставини є причинами розроблення спеціальних технологій вихрострумного контролю, які побудовані на використанні ВСП складної форми, робоча поверхня яких відтворює профіль контрольованої поверхні в зоні галтелі [13]. Такий підхід обмежує можливість контролю ділянок об'єкта контролю (ОК) з різним радіусом кривизни поверхні. Універсальнішими є ВСП на гнучкій підкладці з широкою зоною контролю, але вони не відповідають вимогам щодо чутливості до дефектів. Для зменшення рівня характерних для феромагнітних сталей завад під час виявлення тріщин під покриттям перспективним вважають імпульсний метод ВК [14–16]. Підсумовуючи, зазначимо, що цей підхід виключає можливість використання широко розповсюджених ВД з гармонічним струмом збудження, а серійні ВД з імпульсним збудженням на ринку засобів вихрострумного НК поки що відсутні.

Як зазначалось вище, достовірному виявленню тріщин в ОК із феромагнітних сталей вихрострумним методом часто заважають завади, що виникають через магнітну та структурну неоднорідність досліджуваного матеріалу [12, 17, 18]. Тому в багатьох застарілих документах і публікаціях вихрострумний метод НК взагалі визначався як непридатний або малонадійний для виявлення дефектів у феромагнітних сталях. Зазначимо декілька підходів зменшення впливу згаданих специфічних завад. Перший полягає в додатковому підмагнічуванні досліджуваної ділянки ОК. Такий підхід часто дає позитивний результат, особливо при введенні в конструкцію ВСП спеціальних екранів (наприклад, Учанін В.М. Вихрострумний накладний перетворювач для контролю феромагнітних матеріалів. Патент України № 99379). Але додаткові екрани збільшують розмір ВСП, що не завжди доречно. Крім того, додаткове підмагнічування обмежує чутливість ВСП через намагнічування феритового осердя. Інший підхід можна реалізувати шляхом створення селективних ВСП, які мають невисокий рівень завад, пов'язаних з магнітною неоднорідністю матеріалу ОК. Наш досвід

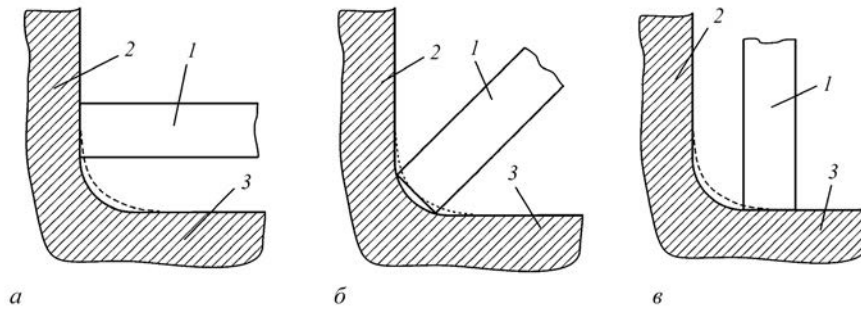


Рис. 2. Розташування ВСП у крайньому положенні на пері лопатки (а), у зоні максимальної кривизни галтельного переходу (б) та у крайньому положенні на полці лопатки (в): 1 – ВСП; 2 – перо лопатки; 3 – полка лопатки

показує, що багато складних задач вихрострумової дефектоскопії ОК із феромагнітної сталі можна вирішити шляхом використання ВСП подвійного диференціювання [17–20], які складаються із розташованих по кутах квадрату двох генераторних і двох вимірювальних обмоток. Усі обмотки намотують на однакових циліндричних феритових осердях. При цьому обидві генераторні обмотки з'єднують послідовно та орієнтують для створення однакових і протилежних первинних електромагнітних полів. Така конструкція ВСП дозволяє розміщувати обмотки в металевий циліндричний корпус (зазвичай, із алюмінієвого сплаву), що суттєво зменшує рівень електронних завад. Під час монтажу обмоток проводять їх ретельне балансування, орієнтуючись на мінімальний рівень завад, які утворюються під час збільшення відстані ВСП до металевого зразка у вигляді плоскої пластини. Під час встановлення обмоток у металевий корпус необхідно забезпечити рівну відстань обмоток до внутрішньої стінки, щоб не порушити отриманий під час налаштування ВСП баланс.

Дослідження сигналів ВСП та оптимізація режимів контролю галтельних переходів лопаток. Під час поперечного сканування галтельної зони лопатки при використанні ВСП циліндричної форми з плоскою робочою поверхнею мають місце зміни відстані ВСП від поверхні ОК, як це схематично показано на рис. 2. Тому під час вибору ВСП перевагу слід надавати ВСП меншого діаметру, які краще прилягають до поверхні галтелі. Попередні дослідження показали, що для контролю галтельних зон лопатки найкраще підходить ВСП типу МДФ 0501 із зовнішнім робочим діаметром 5 мм (рис. 3). У нашому випадку такий невеликий розмір ВСП дозволяє сканувати зону галтельних переходів лопатки, не створюючи зазорів більше 0,5 мм.

Сигнали ВСП типу МДФ 0501 досліджували за допомогою стандартного зразка (СЗ) типу СОП 2353.08 (виробник – НВФ «Промприлад», Київ) із феромагнітної сталі 45 з електроерозійними дефектами типу тріщини різної глибини. Для наших досліджень використовували тільки дефекти завглибшки 0,2 і 0,5 мм. Ширина (розкриття) штучних дефектів – близько 0,1 мм. Дослідження

чутливості та реєстрацію сигналів ВСП проводили за допомогою вихрострумової плати типу EDDYMAX фірми «Test Maschinen Technik», Німеччина. Сканування дефектної зони СЗ проводили за оптимальної орієнтації ВСП, коли лінія, що з'єднує центри обмоток збудження, орієнтована під кутом 45° відносно напрямку тріщини [20]. Сигнал від тріщини має «квазіабсолютний» характер, коли максимальна амплітуда відповідає положенню ВСП безпосередньо над тріщиною подібно до сигналу ВСП абсолютного типу [20]. Для вибору оптимальної орієнтації на корпус ВСП нанесено спеціальну позначку (рис. 3).

Практичною метою експериментальних досліджень є вибір оптимальної частоти, яка забезпечить найкращі умови виявлення дефектів у вигнутій зоні галтельного переходу лопатки. Комплексна концепція такої оптимізації передбачає вибір робочої частоти f_{op} , за якої можна досягти не тільки достатньо високого рівня амплітуди сигналу від дефекту U_D , а й найкращого співвідношення R_{DL} амплітуди сигналу від дефекту до амплітуди сигналу від завади, якою в нашому випадку є амплітуда сигналу U_L , обумовленого зміною зазору між робочою поверхнею ВСП і поверхнею ОК під час сканування. Крім того, додаткову можливість для



Рис. 3. Дослідницький макет ВСП типу МДФ 0501

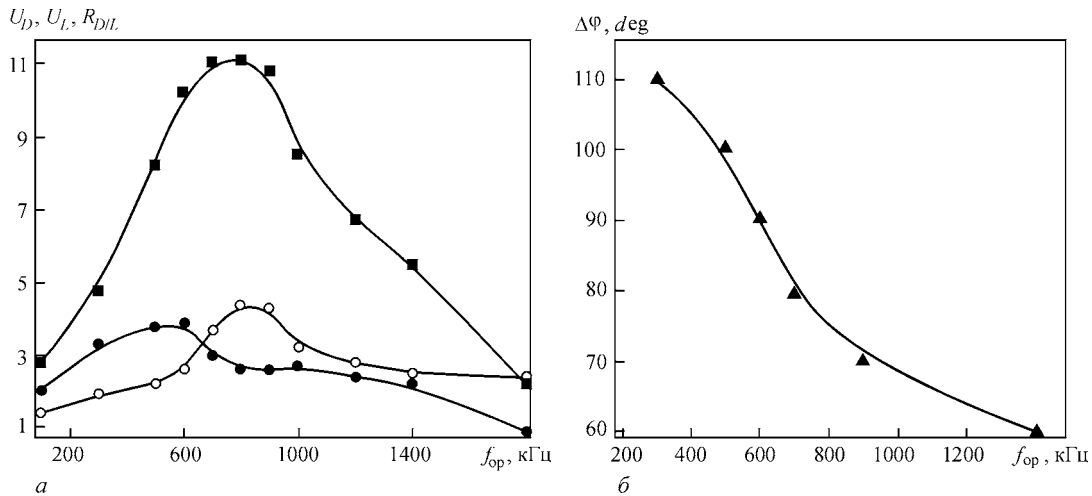


Рис. 4. Залежності амплітуди сигналу від дефекту U_D (■), зміни зазору U_L (●) та співвідношення $R_{D/L}$ (○) амплітуди сигналу від дефекту до амплітуди сигналу від зміни зазору від робочої частоти f_{op} (а), а також залежність різниці $\Delta\phi$ (▲) фазових кутів сигналу від дефекту і зміни зазору від робочої частоти f_{op} (б)

розділення корисних сигналів від дефектів і зміни зазору шляхом використання комплексної площини маємо за різних напрямків (різних кутів) сигналів від дефекту та сигналів зміни зазору. Найкращі умови для виділення сигналів від дефектів на фоні сигналів від завад загалом виконуються, коли ми маємо прямий кут ($\Delta\phi = 90^\circ$) між ними. Але з практичного досвіду менша різниця напрямків (але більша 60°) також може бути ефективно використана, бо в цьому випадку кут може бути збільшено вибором різної чутливості по ортогональних каналах ВД. Фактор напрямку сигналів у комплексній площині іноді дозволяє приймати компромісні рішення та мати вирішальне значення щодо вибору оптимальної робочої частоти в складних ситуаціях, коли амплітуди сигналів від дефектів і завад є близькими.

На рис. 4, а наведено залежності амплітуди сигналу від дефекту U_D , амплітуди сигналу від зміни зазору U_L та співвідношення $R_{D/L}$ амплітуди сигналу від дефекту до амплітуди сигналу від зміни зазору від робочої частоти f_{op} у діапазоні 100...1800 кГц. Сигнали від дефекту отримано скануванням зразка в зоні штучного дефекту завглибшки 0,2 мм, що відповідає мінімальному розміру тріщини, яку необхідно виявляти в лопатках відповідно до технічних вимог. Амплітуду сигналу, обумовлену зміною зазору, оцінювали відведенням ВСП від поверхні СЗ на відстань, суттєво більшу за 10 мм. Амплітуди сигналів від дефекту та зазору наведено в умовних величинах за поділками шкали дисплея вихрострумової системи, тому що співвідношення поділок і фізичних одиниць амплітуди сигналу невідоме через відсутність відповідного калібрування.

На рис. 4, б наведено залежність різниці фазових кутів сигналів від дефекту та зміни зазору $\Delta\phi$, які з достатньою для практики точністю оцінювали за напрямком годографів сигналів у комплексній площині ВД.

Зазначимо, що амплітуда сигналів від дефектів є достатньо високою для їх виявлення в усьому діапазоні досліджуваних частот (100...1800 КГц). Найбільші амплітуди сигналів від дефекту завглибшки 0,2 мм спостерігаються на робочих частотах 600...800 кГц (рис. 4, а), які можна вважати оптимальними за цим критерієм. Але найкраще співвідношення сигналу від дефекту до сигналу від завад спостерігається на робочій частоті 800 кГц. Аналіз зміни різниці фазових кутів $\Delta\phi$ сигналів (рис. 3, б) показує, що за цим критерієм оптимальною є робоча частота 600 кГц, за якої кут між корисним сигналом від дефекту та сигналом зміни зазору близький до прямого (90°). Враховуючи проаналізовані вище результати, робоча частота 700 кГц визначена як оптимальна. У подальшому сигнали від дефектів реєстрували на цій робочій частоті.

Для аналізу чутливості ВСП за різної відстані ВСП від поверхні ОК реєстрацію сигналів ВСП від дефектів завглибшки 0,2 і 0,5 мм проводили за безпосереднього контакту ВСП з поверхнею ОК і за відстані 0,5 мм, яка забезпечувалась діелектричною пластиною відповідної товщини.

На рис. 5 наведено сигнали, обумовлені дефектами завглибшки 0,2 і 0,5 мм, у комплексній площині ВД на робочій частоті 700 МГц, які отримано за нульової відстані ВСП від поверхні СЗ (а) і через діелектричну пластину завтовшки 0,5 мм (б). На рис. 5, б чутливість реєстрації сигналів під час сканування через діелектричну пластину збільшено на 12 дБ для компенсації суттєвого зменшення амплітуди.

Наведені на рис. 5 сигнали показують можливість виявлення дефекту, що характеризує поріг чутливості по глибині (0,2 мм) з достатньо високим співвідношенням сигнал/завада навіть під час контролю через діелектричну пластину завтовшки 0,5 мм. Зазначимо, що для ВСП, віддаленого від поверхні ОК на відстань 0,5 мм (без діелектричної пластини), результати будуть ідентичними. Вид-

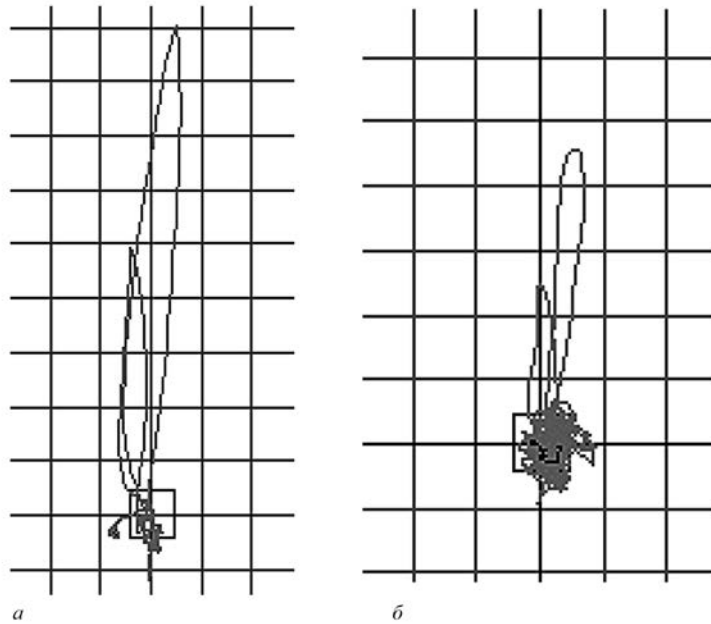


Рис. 5. Сигнали, обумовлені дефектами завглибшки 0,5 мм і 0,2 мм, за безпосереднього контакту ВСП з поверхнею зразка (а) та з зазором 0,5 мм у комплексній площині (б)

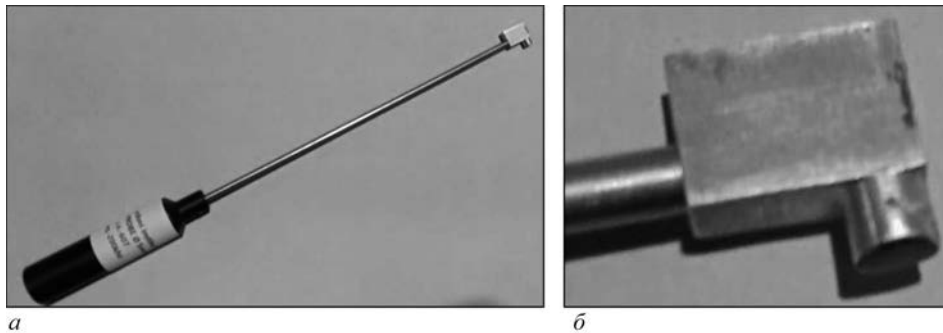


Рис. 6. Вихрострумний перетворювач типу МДФ 0501 із винесеним чутливим елементом: загальний вигляд (а), чутливий елемент ВСП (б)

но, що амплітуда сигналу від дефекту завглибшки 0,5 приблизно на 80 % більша за амплітуду сигналу, створеного дефектом завглибшки 0,2 мм,

як для випадку безпосереднього контакту ВСП з поверхнею СЗ, так і для контролю через діелектричну пластину завтовшки 0,5 мм. Крім того, на екрані ВД можна спостерігати електронний шум, який на підвищеній чутливості (рис. 5, б) є, відповідно, більшим приблизно на 12 дБ. На рис. 5, а спостерігається сигнал від зміни зазору у вигляді маленького «хвостика», який відходить вліво від нульової точки, що відповідає компенсації небалансу ВСП під час встановлення його на бездефектну частину СЗ. На рис. 5, б сигнал від зміни зазору вже не спостерігається, тому що ВСП вже віддалено на 0,5 мм від поверхні СЗ і чутливість до змін зазору є суттєво меншою.

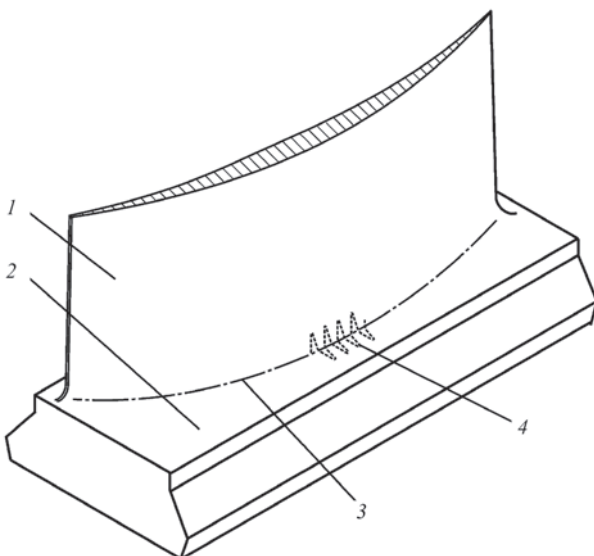


Рис. 7. Зигзагоподібна траєкторія сканування зони галтельного переходу: 1 – перо лопатки; 2 – полка лопатки; 3 – лінія спряження галтелі; 4 – траєкторія сканування

Випробування запропонованої технології вихрострумової дефектоскопії галтельних зон лопаток турбін в умовах експлуатації. Для контролю лопаток газової турбіни без їх демонтажу (під час інспекційної зупинки турбіни) виготовлено спеціальний ВСП, чутливий елемент якого за допомогою тонкої трубки із аустенітної сталі діаметром 3,5 мм винесено на відстань 20 мм від

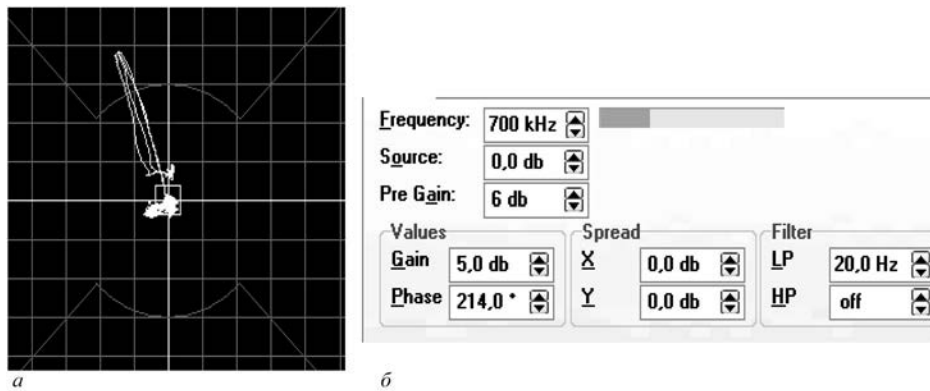


Рис. 8. Сигнали від короткого дефекту типу прорізу (див. рис. 1) у реальній лопатці (а) та відображення параметрів контролю на дисплеї (б)



Рис. 9. Виробничі випробування запропонованої технології вихрострумове контролю лопаток газових турбін

рукояті, якою оперує дефектоскопіст. При цьому чутливий елемент орієнтовано перпендикулярно відносно осі рукояті (рис. 6).

На рис. 7 схематично показано фрагмент лопатки із зигзагоподібною траєкторією ручного сканування 4 зони галтельного переходу між пером 1 і полкою 2 лопатки. На практиці це виконується повертаннями ВСП навколо осі рукояті з поступовим просуванням його вздовж галтелі. Крок між лініями сканування приблизно 0,5 мм, що забезпечує надійне виявлення дефектів завдовжки більше 2 мм. Під час сканування оператор-дефектоскопіст повинен підтримувати перпендикулярне положення чутливого елемента ВСП відносно опуклої поверхні галтелі. Ця операція вимагає певного досвіду. Тому оператор-дефектоскопіст попередньо відпрацьовує її на реальній лопатці зі штучним дефектом (рис. 1).

Наведений на рис. 6 ВСП типу МДФ 0501 із видовженою трубкою випробувано на лопатці компресора газової турбіни з електроерозійним прорізом завдовжки 4 мм, завглибшки 0,2 мм і розкриттям 0,1 мм у зоні галтельного переходу, яка призначена для налаштування обладнання та перевірки технології контролю. Отримані результати наведено на рис. 8, де зображено дисплей ВД у режимі відтворення комплексної площини сигналів. На дефектограмі видно два близьких за амплітудою сигнали від дефекту, бо ВСП перетинав зону дефекту двічі. Це дало можливість високо оцінити повторюваність під час отримання сигналів від дефектів. Сигнали від дефекту орієнтовано та чітко попадають у секторну рамку автоматичної сигна-

лізації. Сигнали, обумовлені змінами зазору, під час зигзагоподібного сканування зони галтелі на відстані від дефекту, по-перше, є суттєво меншими відносно сигналу від дефекту, а, по-друге, орієнтовані вліво від початкової точки (точка балансування ВСП), тобто відрізняються за напрямком.

Випробування показали, що ВСП типу МДФ 0501 за вибраних оптимальних параметрів контролю характеризується високою чутливістю та селективністю контролю навіть за умов ручного сканування. Встановлені параметри щодо чутливості ВД використовують тільки незначну частину можливостей щодо підсилення сигналів ВСП (рис. 8, б).

Розроблену технологію вихрострумової дефектоскопії лопаток успішно випробувано також в експлуатаційних умовах на газових турбінах фірми «Nuovo Pignone SPA» (Флоренція, Італія), яка є регіональним представником американської багатонаціональної корпорації «General Electric» (<https://ge-nuovopignone.com>) (рис. 9).

Висновки

Розглянуто результати експериментальних досліджень, метою яких є створення ефективної технології вихрострумової дефектоскопії критичної зони галтельних переходів лопаток газових турбін із феромагнітних сталей. Запропоновану технологію контролю реалізовано шляхом використання селективних ВСП подвійного диференціювання, які забезпечують високу чутливість під час контролю за умов зміни зазору між робочою поверхнею ВСП і поверхнею лопатки в галтельній зоні. Запропоновано комплексний підхід щодо оптимального

вибору робочої частоти. Проведені дослідження сигналів ВСП типу МДФ 0501 (діаметр робочої поверхні – 5 мм) дозволили мінімізувати вплив завад вибором робочої частоти та вибрати параметри сканування контрольованої зони, що підтверджено на реальній лопатці зі штучним дефектом завдовжки 2 мм і завглибшки 0,2 мм, який характеризує заданий технічним завданням поріг чутливості. Ефективність запропонованої технології підтверджено під час її випробувань на підприємствах енергетичної галузі, зокрема на газових турбінах фірми «Nuovo Pignone SPA» (Флоренція, Італія).

Список літератури/ References

- Benini, E. (Ed) (2011) *Advances in gas turbine technology*. InTech, Rijeka, Croatia. www.intechopen.com.
- Mane, S. (2023) Advancements in gas turbine engine technology: A conceptual aspect. *Inter. J. of Enhanced Research in Science, Technology & Engineering*, 12(7), 37–41. DOI: <https://doi.org/10.55948/IJERSTE.2023.0706>
- Субботович В.П., Юдин Ю.А., Юдин А.Ю., Бояршинов А.Ю. (2013) Исследование прикорневой зоны рабочей лопатки турбины. *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Харків, НТУ «ХПІ», 13(987)*, 34–37. Subbotovich, V.P., Yudin, Yu.A., Yudin A.Yu., Boyarchinov, A.Yu. (2013) Examination of near-root zone of turbine blade. *Visnyk KhPI, Series Power and Heat Engineering Processes and Equipment*, 13(987), 34–37 [in Russian].
- Sameezadeh, M., Farhangi, H. (2012) *Fracture analyzes of generator fan blades*. *Applied Fracture Mechanics*, Rijeka, InTech, 311–330. www.intechopen.com.
- Rajabinezhad, M., Bahrami, A., Mousavinia, M., Seyedi, S., Taheri, P. (2020) Corrosion-fatigue failure of gas-turbine blades in an oil and gas production plant. *Materials*, 13(4), 900. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13040900>.
- Abassi, W., Rahman, S., Metala M. (2008) *NDE techniques and lifetime assessment of turbine equipment*. Power-Gen International, Orlando Florida.
- Pitkänen, J., Hakkarainen, T., Jeskanen, H. et al. (2000) NDT methods for revealing anomalies and defects in gas turbine blades. *15th World Conf. on Non-Destructive Testing*, Rome. www.ndt.net.
- Abassi, W., Fair, M. (2006) Ultrasonic phased array inspection of turbine components. *9th European Conf. on Non-Destructive Testing*, Berlin. www.ndt.net.
- Libby, H. (1971) *Introduction to electromagnetic nondestructive test methods, 1st ed.* Wiley-Interscience, New York, NY, USA.
- Udpa, S.S., More, P.O. (Eds) (2004) *Nondestructive testing handbook (third edition)*. Vol. 5, Electromagnetic testing, American Society for NDT.
- Garciamartín, J., Gómezgil, J., Vázquezsánchez, E. (2011) Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors*, 11, 2525–2565. DOI: <https://doi.org/10.3390/s110302525>
- Helifa, B., Oulhadj, A., Benbelghit, A., Lefkaier, I., F. Boubenider F., Boutassouna D. (2006) Detection and measurement of surface cracks in ferromagnetic materials using eddy current testing. *NDT&E International*, 39, 384–390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.11.004>.
- Jansen, H. (2012) Eddy current testing: profiled eddy current probes for complex shape inspection. *18th World Conf. on Non-Destructive Testing*, Durban. www.ndt.net.
- Nath, S. C., Batzinger, T. J., Rose, C. M., Plotnikov, Y. A., Herd, K. G. (2004) *Method for in-situ eddy current inspection of coated components in turbine engines*. US Patent № 6707297, G01N27/82, GE Company, publ. 16.03.2004.
- Tian, G.Y., Sophian, A. (2005) Reduction of lift-off effects for pulsed eddy current NDT. *NDT&E International*, 38, 319–324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2004.09.007>
- Kuts, Y., Lysenko, J., Dugin, A., Zakrevskii, A. (2016) Analysis of an eddy-current transducer with impulsive excitation in the nondestructive testing of cylindrical objects. *Mater. Sci.*, 52(3), 431-437. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9975-4>.
- Uchanin, V., Nardoni, G. (2019) Detection of cracks in ferrous steel structures: new innovative eddy current techniques. *Procedia Structural Integrity*, 16, 198–204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.041>
- Uchanin V., Nardoni G. (2013) Eddy current detection of cracks in ferromagnetic steel structures. *The Fundamentals of Structural Integrity and Failure*. Ed. by M. Richard. Wilcox, Nova Science Publishers, NY, USA, 193–221.
- Учанін В.М., Іващенко К.А. (2021) Виявлення дефектів конструкцій із феромагнітних сталей через шар антикорозійного покриття без його видалення. *Методи та прилади контролю якості*, 1(46), 5–14. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2021-1\(46\)-5-14](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2021-1(46)-5-14)
- Uchanin, V.M., Ivashchenko, K.A. (2021) Detection of defects of structures from ferromagnetic steel through the layer of anticorrosion cover without removal. *Metody ta Prylady Kontrolyu Yakosti*, 1(46), 5–14. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2021-1\(46\)-5-14](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2021-1(46)-5-14) [in Ukrainian].
- Uchanin, V. (2023) Surface eddy current probes of double differential type as an effective tool to solve non-destructive inspection problems. *The Paton Welding J.*, 2, 46–55. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.02.07>

DETECTION OF FATIGUE CRACKS IN THE FILLET ZONE OF STEEL BLADES OF INDUSTRIAL GAS TURBINES USING EDDY CURRENT METHOD

V.M. Uchanin¹, D. Nardoni², P. Nardoni²

¹G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine. E-mail: vuchanin@gmail.com

²I&T Nardoni Institute, Via della Cascina Pontevecica, 21, 25124, Brescia, Italy. E-mail: nardoni.campus@gmail.com

The results of experimental investigations needed for the development of an effective eddy current technique for detection of the fatigue cracks originated in the critical fillet zone of gas turbine blades from ferromagnetic steels are discussed. The proposed inspection technique is based on using selective eddy current probes of double-differential type, which can ensure a high sensitivity when the clearance between the probe operational surface and the blade surface in the fillet zone is changed during the scanning. Experimental investigation of signals of eddy current probe of MDF 0501 type (operational surface diameter of 5 mm) allowed minimizing the lift-off influence by selecting the optimal operating frequency and the scanning parameters of the inspected zone. The proposed technique effectiveness was confirmed with the application for a real gas turbine blade with a 2 mm long and 0.2 mm deep artificial defect in the fillet zone, which characterizes the sensitivity threshold in accordance with the technical assignment. The developed technique has been used with success also during its trials in the power industry plants. 20 Ref., 9 Fig.

Keywords: gas turbine blade, fillet zone, eddy current probe, operation frequency

Отримано 11.04.2024

Отримано у переглянутому вигляді 10.05.2024

Прийнято 12.06.2024

ПРАКТИКА ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДОЛОГІЇ РИЗИК-АНАЛІЗУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗВАРНИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ В УКРАЇНІ

В.М. Тороп

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: v.torop@gmail.com

Розробка стандартних підходів, заходів регуляторного реагування та узгоджених дій на міжнародному, регіональному, національному та локальному рівнях є найкращим і, можливо, єдиним засобом впливу на ризик, що може мати негативні наслідки у вигляді руйнувань, аварій, катастроф. Це завдання вимагає термінового рішення, оскільки кількість ризиків у сучасному світі зростає. Однією з основних цілей, встановлених стандартом ISO 31000, є постійне вдосконалення управління ризиками в організаціях на основі загальної моделі, призначеної для адаптації до широкого спектру ризиків. Стаття присвячена огляду стану справ щодо впровадження методології ризик-аналізу в Україні та практиці його використання для зварних металоконструкцій. Бібліогр. 17, рис. 3.

Ключові слова: ризик, стандартизація, управління цілісністю, міст ім. Є.О. Патона

Вступ. Повномасштабна війна з російською федерацією, удари дронами по енергетичним та інфраструктурним об'єктам, ракетні, артилерійські та мінометні обстріли прикордонних територій та територій в зоні проведення бойових дій, тероризм, кібератаки, рейдерство, підрих репутації тощо – це лише невеликий перелік загроз, які щоденно заповнюють наше життя. Кожна з цих загроз має ризик реалізації. А від реалізації загрози залежать збитки, що з нею пов'язані. Масштаб збитків залежить від суб'єкта, для якого існує ця загроза. Це може бути світ, країна, організація, особа.

Ризик існує завжди, але, вочевидь, прийняття управлінських рішень щодо зменшення ризику потребує структурованого підходу. У фундаментальній статті [1] нагальність впровадження системи з оцінки ризику в Україні автор відносить до проблеми національної безпеки. Приведемо дуже красномовну цитату з неї: «Відставання нашої держави в цій сфері стає загрозливим. Це веде не тільки до дискредитації української науки, а й до неефективності національної промисловості, її високої аварійності і, що страшніше, до невинуватених людських жертв. У зв'язку з тим, що завдання оцінки ризику можна розглядати як завдання прийняття багатокритеріального колективного рішення, що вимагає дослідження широкого кола питань у технічній, економічній, соціальній сферах життя, виникає необхідність створення в Україні системи адміністративного управління ризиком».

Такий стан речей частково обумовлений відсутністю державницького підходу до управління ризиками в колишньому Радянському Сою-

зі, де ціна безпеки людини та екології аж ніяк не була високою. Як зазначали автори [2]: «...в десятитомному виданні «Надійність і ефективність в техніці», що вийшов у світ протягом 1987–1990 рр., навіть не згадується поняття ризик-аналізу. Так само не описуються багато його важливих складових, наприклад, методи розрахунку наслідків аварій, що проявляються в їхньому впливі на здоров'я людей чи на економічні показники, на методи оцінки ймовірності руйнування на основі фізичних моделей як за допомогою наближених аналітичних підходів, так і чисельного моделювання методом Монте-Карло або його похідними. Разом з тим, відповідальність за відсутність в Україні як нормативів з ризику, так і з надійності (одна із складових ризику) промислових об'єктів у рівній мірі лягає як на вчених у галузі міцності та надійності, так і на чиновників, що мають забезпечувати нагляд за безпекою праці».

Поняття ризику є надзвичайно широким і в цитованій вище статті [1] та фундаментальних працях [3–5] даються окремі його аспекти, визначення та застосування в різних галузях науки, техніки, людської діяльності. Завдання технічних спеціалістів полягає в розкритті його змісту та впровадженні в окремих галузях промисловості. Важливим тут є врахування міжнародного досвіду, реальних технічних можливостей промисловості та сучасних досягнень учених.

Впровадження методології ризик-аналізу в Україні. Практика впровадження методології ризик-аналізу в Україні бере свій початок з прийняттям Закону України «Про об'єкти підвищеної небезпеки» (Відомості Верховної Ради України, 2001 р., № 15, ст. 73 із наступними змінами) [6]. Згідно з порядком декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки, що визначається Постаново-

вою Кабінету Міністрів України від 11.07.2002 р. № 956 [7], оцінка рівня ризику проводиться згідно з Методикою визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки, що затверджена Наказом Міністерства праці та соціальної політики від 04.12.2002 р. № 637.

Уряд України в рамках виконання Кіотської програми 2005–2015 рр. у січні 2014 р. затвердив «Концепцію управління ризиками техногенних та природних надзвичайних ситуацій», схвалену розпорядженням Кабінету Міністрів України № 37-р від 22.01.2014 р. [8].

Основна мета Концепції – досягнення прийнятних рівнів ризиків по всій Україні, що реалізується за наступними етапами:

1) визначити рівні ризику для всіх галузей економіки та найнебезпечніших джерел надзвичайних ситуацій і забезпечити їх зниження до прийнятних рівнів ризику;

2) досягти рівня ризику по всій Україні відповідно до термінів, що застосовуються в економічно розвинених країнах.

План реалізації Концепції на 2015–2020 рр. передбачав створення наступних довідників:

– організаційний довідник: семінари, наукові конференції щодо впровадження в Україні системи управління безпеками при надзвичайних ситуаціях техногенного та природного характеру;

– довідник нормативно-правових актів: удосконалення законодавчих норм щодо впровадження підходів, заснованих на ризиках;

– методичний довідник: розробка методики оцінки ризику науково-дослідними установами, систематизація за видами надзвичайних ситуацій;

– навчальний довідник: навчальні програми для експертів з управління ризиками в галузі техногенної та природної безпеки.

З метою виконання Сендайської програми щодо зменшення ризику стихійних лих на 2015–2030 рр. [9], що була прийнята III Всесвітньою конференцією ООН у м. Сендай, Японія 18.03.2015 р., Кабінет Міністрів України затвердив Стратегію реформування Державної служби з надзвичайних ситуацій України, яка, серед іншого, передбачає повномасштабне реформування державної системи реагування щодо надзвичайних ситуацій та вдосконалення її здатності боротися із природними та техногенними загрозами. У Сендайській програмі зі зменшення ризику стихійних лих на 2015–2030 рр. окреслено сім чітких цілей і чотири пріоритети для дій щодо запобігання нових і зменшення існуючих ризиків стихійних небезпек:

– розуміння ризику стихійних небезпек;

– посилення управління ризиками стихійних небезпек;

– інвестиції у зменшення ризиків стихійних небезпек;

– підвищення готовності до стихійних небезпек для ефективного реагування та отримання кращих практик під час відновлення, реабілітації та реконструкції.

Сендайська програма спрямована на досягнення суттєвого зниження ризику лиха та втрати життя, засобів до існування та здоров'я, а також економічних, фізичних, соціальних, культурних та екологічних активів людей, підприємств, громад і країн протягом наступних 15-ти років.

Крім того, в рамках Угоди про асоціацію між Україною, з одного боку, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії та їх державами-членами, з іншого боку, був розроблений план імплементації деяких законодавчих актів ЄС (затверджено Кабінетом Міністрів України 25.10.2017 р. № 1106), [10] що передбачає виконання:

– Директиви 2012/18/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 4.07.2012 р. «Про боротьбу з небезпеками великих аварій з небезпечними речовинами»;

– Директиви 2007/60/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 23.10.2007 р. «Про оцінку та управління ризиками повеней».

Для зменшення збитків і намагаючись стандартизувати алгоритм дій на випадок прояву того чи іншого ризику, узагальнюючи світовий досвід, у 2009 р. ISO – Міжнародною організацією зі стандартизації (<https://www.iso.org>) було прийнято серію міжнародних стандартів з ризик-менеджменту, зокрема:

– ISO Guide 73:2009 Risk management – Vocabulary (<https://www.iso.org/standard/44651.html>);

– ISO/IEC 31000:2009 Risk management – Principles and guidelines (<https://www.iso.org/standard/43170.html>);

– ISO/IEC 31010:2009 Risk management – Risk assessment techniques (<https://www.iso.org/standard/51073.html>).

У 2013 р. опубліковано інструкцію з впровадження ISO 31000 ISO/TR 31004:2013 Risk management – Guidance for the implementation of ISO 31000 (<https://www.iso.org/standard/56610.html>).

Вищенаведені стандарти є стандартами управління ризиками «верхнього рівня». Вони були прийняті в якості національних стандартів більш ніж 50-ма національними органами зі стандартизації, що охоплюють понад 70 % населення світу. Вони також прийняті деякими організаціями ООН і національними урядовими організаціями в якості основи для розробки власних ризик-орієнтованих стандартів і методик.

Відповідно до плану імплементації міжнародної законодавчої бази, згідно з Законом України «Про стандартизацію» від 05.06.2014 р. № 1315-VII [11] в Україні прийнято аналоги міжнародних стандартів 2009 р.:

– ДСТУ ISO Guide 73:2013 «Керування ризиком. Словник термінів» [12];

– ДСТУ ISO 31000:2014 «Менеджмент ризиків. Принципи та керівні вказівки» [13];

– ДСТУ ISO/IEC 31010:2013 «Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику» [14].

Розвиток ризик-аналізу в світі. Розробка міжнародних стандартів, заходів регуляторного реагування та узгоджених дій на міжнародному, регіональному, національному та локальному рівнях є найкращим і, можливо, єдиним засобом впливу на ризик, що має потенційно глобальні наслідки. Це завдання вимагає термінового рішення, оскільки кількість ризиків у глобальному масштабі зростає. Однією з основних цілей, встановлених стандартом ISO 31000 [13], є постійне вдосконалення управління ризиками в організаціях на основі загальної моделі, призначеної для адаптації до широкого спектру ризиків.

Хоча за правилами ISO будь-який стандарт повинен переглядатися кожні п'ять років, базовий стандарт ISO 31000 з ризик-менеджменту протримався в обігу майже дев'ять років. За цей час накопичився вагомий досвід у сфері керування ризиками. Вчорашні практики керування ризиками не є адекватними в боротьбі із сьогоднішніми загрозами. Ці механізми необхідно модернізувати. Такі похідні стали причиною перегляду стандарту ISO 31000 [13].

У 2018 р. було опубліковано новий посібник, щоб допомогти користувачам повністю оптимізувати його значення. ISO 31000:2018 «Управління ризиками» – практичний посібник, який допомагає організаціям інтегрувати ефективну структуру прийняття рішень у своє управління, лідерство та культуру шляхом оптимального використання ISO 31000.

Сам стандарт пояснює фундаментальні концепції та принципи управління ризиками, водночас описуючи структуру та окреслюючи процеси для ідентифікації та управління ризиками. Він надає розширену інформацію та контекст до розділів ISO 31000, включаючи вказівки щодо розробки плану інтеграції ризику в існуючий документообіг організації, комунікації із зацікавленими сторонами, моніторинг і перегляд плану управління ризиками та багато іншого.

ISO 31000:2018 [13] розроблено у співпраці з UNIDO (Організація промислового розвитку ООН). ISO 31000:2018 – це стислий посібник, який допоможе організаціям використовувати принципи управління ризиками для поліпшення планування та прийняття ефективніших рішень.

На офіційному сайті ISO [<https://www.iso.org/home.html>] наведені основні зміни стосовно попередньої версії стандарту, як-от:

1. Проводиться аналіз принципів управління ризиками, які є надважливими критеріями успіху.

2. Увагу зосереджено на лідерстві вищого керівництва, яке має забезпечити інтеграцію менеджменту ризиків, поширити її на всі процеси, починаючи з керівництва організації.

Отже, ISO 31000 – це стандарт управління ризиками, який прийнято в 90 % найбільших економік світу.

На сайті міжнародної організації зі стандартизації (ISO) у червні 2019 р. з'явилася друга редакція міжнародного стандарту IEC 31010:2019 «Менеджмент ризику. Методи оцінки ризику» (Risk management – Risk assessment techniques) [14]. Як повідомляється на сайті ISO «...цей документ надає вказівки щодо вибору та застосування методів оцінки ризику в широкому діапазоні ситуацій. Методи використовуються для надання допомоги у прийнятті рішень, де є невизначеність, для надання інформації про певні ризики та як частина процесу управління ризиками». Це друге видання скасовує та замінює перше видання, яке було опубліковано у 2009 р. У документі детальніше розглянуто процес планування, впровадження, перевірки та підтвердження використання методів; збільшено кількість і діапазон застосування методів.

IEC 31010 було підготовлено 56-м Технічним комітетом «Надійність» Міжнародної Електротехнічної комісії (IEC) спільно з 262 ТЗ ISO. Цей стандарт доповнює положення ISO 31000 [13].

ISO/IEC 31010 фокусується на поняттях, процесах і виборі методу оцінки ризиків, забезпечує основу для прийняття рішення щодо застосування найдоцільнішого підходу щодо оцінки конкретних ризиків. У стандарті наведено приклади різних методів оцінки ризику (у тому числі «мозковий штурм», метод Делфі, «попередній аналіз небезпеки», методи HAZOP, HAZOP, FMEA, FTA, «дерево прийняття рішень», техніка SWIFT, метод Монте-Карло та ін. – всього 31 метод) і дано посилення на інші міжнародні стандарти, у яких докладніше описано їх застосування.

Інформаційно-аналітична система управління технічним станом та цілісністю об'єктів трубопровідно-транспортних мереж «ІТТ-PIMS». Україна має побудувати нову систему управління безпекою на основі підходу, що ґрунтується на оцінці ризику, яка є частиною управлінського процесу, а також має фундаментальне значення для управління організацією на всіх рівнях.

Наприклад, Оператор газотранспортної системи України (ОГТСУ) з 2021 р. впроваджує Інформаційно-аналітичну систему управлін-

ня технічним станом та цілісністю об'єктів трубопровідно-транспортних мереж «ІТТ-РІМС». Цей програмний комплекс пропонує інформаційну систему управління процесами РІМС (Pipeline Integrity Management Systems) для систем транспортування газу. Програмний продукт дозволить впровадити комплексну оцінку технічного стану та безпеки функціонування магістральних газопроводів, визначити технічний стан інфраструктури, проводити оцінку ризиків, розробляти плани їх профілактики та зменшення наслідків можливих аварій.

Інформаційно-аналітична система складається з 52-х модулів і трьох підсистем, які спрямовані на такі процеси та завдання:

- формування просторової бази даних об'єктів лінійної частини магістральних газопроводів (ЛЧМГ) та їх об'єктів оточення, розробка інструментарію керування просторовими даними;
- паспортизація основного і допоміжного обладнання та систем, розробка інструменту управління технологічною інформацією;
- графічне відображення даних про ЛЧМГ та об'єкти оточення;
- управління просторовими та моніторинговими даними повітряного патрулювання (у т.ч. матеріалами фото/відеофіксації порушень охоронних зон магістрального газопроводу (МГ));
- технологічний документообіг підрозділів із напрямку експлуатації ЛЧМГ, управління документацією, звітність;
- земельно-кадастровий облік територій проходження МГ;
- управління результатами діагностики та ремонтів об'єктів ЛЧМГ, інтерпретація результатів;
- аналітична оцінка технічного стану об'єктів ЛЧМГ (у т.ч. інтегральна за визначеною групою критеріїв);
- управління ризиками експлуатації ЛЧМГ;
- планування ремонтів;
- управління бюджетом на ремонті роботи ЛЧМГ;
- інтеграція системи з «Комплексною автоматизованою системою керування» (КАСК) на основі SAP ERP та ін.

Слід зазначити, що в практичному застосуванні методології ризик-аналізу виникає ряд проблем, що пов'язані з невизначеністю вибору математичних методів, фізичних моделей і вхідних даних. Особливо це стосується невизначеності в реальному розподілі ймовірнісних величин, що характеризують стан об'єкту чи зовнішніх чинників, амплітуд і періоду повторюваності певних природних катаклізмів. Це ставить під сумнів довіру до абсолютних вихідних числових значень. Без детального опису та обговорення всіх невизначеностей і неоднозначностей, що приймалися в аналізі, практичне застосування таких абсолютних значень повинно бути досить обмеженим. На-

приклад, порівняння результатів з критеріями допустимого ризику, задекларованими в нормах чи стандартах (що набуває все більшого розповсюдження в світі) стає просто математичними вправами. Тому конкретизація вхідних даних, створення відповідної коректної розрахункової моделі, використання сучасних технологій, алгоритмів, системного підходу та стандартизування принципів реалізації ризик-аналізу для кожної конкретної галузі промисловості або життєдіяльності людини стає нагальною необхідністю. Одним із прикладів практичної реалізації вищезазначених підходів є розроблена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України «Методика визначення ризику експлуатації фізично зношених або морально застарілих зварних металоконструкцій, що не відповідають вимогам охорони праці і становлять потенційну загрозу для життя і здоров'я працюючих» [15].

Використання ризик-аналізу при обстеженні технічного стану мосту ім. Є.О. Патона. Результати обстеження корозійного пошкодження головних балок мосту ім. Є.О. Патона через р. Дніпро у м. Києві свідчать про те, що внаслідок протікання крізь деформаційні шви дощової води та води, що утворилася внаслідок танення снігу (містить солі), на зварні металоконструкції головних балок, метал кінцевих ділянок ферм яких примикає до деформаційних швів, зазнав локальних і місцями значних корозійних ушкоджень. За рахунок корозії товщина металу в елементах конструкції, а саме нижніх поясах, нижніх горизонтальних ребрах і в нижній частині стінок головних балок суттєво зменшилася. В окремих випадках (наприклад, у фермах Ф10 і Ф15 головної балки №1 та фермах Ф1 і Ф3 головної балки №4) товщина стінок зменшилась на 40..50 % [16, 17]. Наявність таких корозійних уражень може суттєво знижувати опір втомному руйнуванню зварних з'єднань з виявленими дефектами, що свідчить про зростання ризику руйнування прогонової споруди у випадку подальшого розвитку корозійних процесів.

Для прикладу на рис. 1 наведено результати 133-х замірів товщини стінки ферми та 113-ти замірів товщини вутів для ферми Ф46 головної балки № 4 [16, 17]. Виявлено корозійні пошкодження завглибшки 2...4 мм (позначені жовтим маркером) та більше 4 мм (червоним). Неметалеві включення позначено зеленим маркером.

Чим менша кількість замірів, тим більше ризик пропустити той чи інший дефект. Крім того, корозійні потоншення в зоні зварних швів можуть слугувати додатковим джерелом утворення корозійних тріщин, що ілюструє рис. 2.

Відповідно до розробленої нами «Методики визначення ризику експлуатації зварних металоконструкцій...» [15] ризик експлуатації ферми Ф46 головної балки № 4 визначається індексом 4С на матриці ризику, що приведена на рис. 3 та відповідає предаварійному стану головних ба-

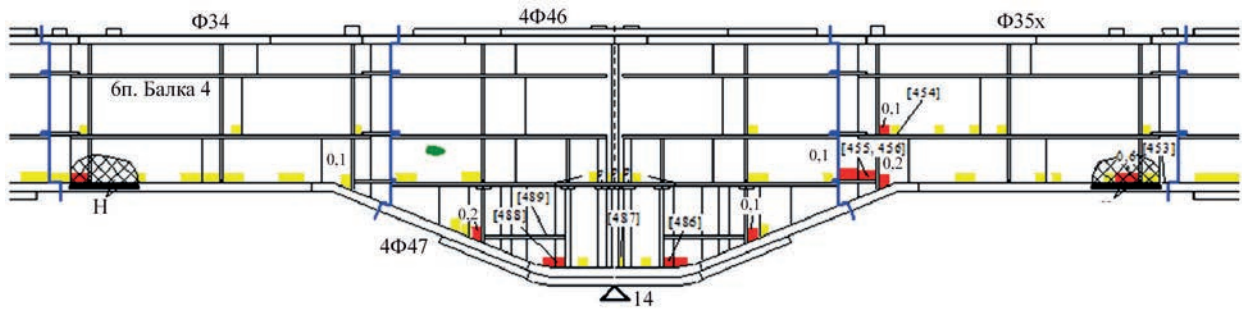


Рис. 1. Результати замірів товщин стінки ферми та вутів для ферми Ф46 головної балки № 4 [17]



Рис. 2. Тріщина, що утворилась в зоні корозійного потоншення зварного шва ферми Ф46 головної балки № 4

лок мосту ім. Є.О. Патона, при цьому ймовірність руйнування досягає значення 0,8.

Згідно з рекомендаціями [15] жовто-гаряча область матриці ризику передбачає необхідність розробки та погодження з регулятором (Департаментом нагляду у промисловості та на об'єктах підвищеної небезпеки Держпраці України) «Декларації безпеки», що включає звіт, план заходів по усуненню недоліків та проведенню покращувальних заходів щодо експлуатації головних балок мосту ім. Є.О. Патона. Крім того, необхідно розробити план, обґрунтувати вибір методів, визначити та погодити термін проведення діагностики та технічного обстеження, що передбачає також обов'язковий детальний аналіз ризику щодо подальшої експлуатації головних балок мосту ім. Є.О. Патона.

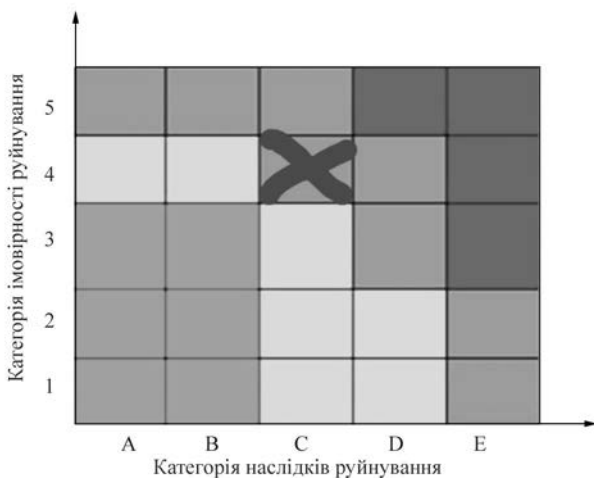


Рис. 3. Матриця ризику експлуатації ферми Ф46 головної балки № 4 мосту ім. Є.О. Патона

Висновки

1. Україна має побудувати систему управління цілісністю зварних металоконструкцій для об'єктів підвищеної небезпеки на основі підходу, що використовує сучасні технології та алгоритми системного аналізу, стандартизації принципів реалізації ризик-аналізу для кожної конкретної галузі промисловості.

2. Оцінка ризиків є частиною управлінського процесу, а також має фундаментальне значення для управління підприємством на всіх рівнях його життєдіяльності. Тому впровадження Методики [15] може слугувати прикладом практичної реалізації найкращих сучасних світових практик у забезпечення надійної та безпечної експлуатації зварних металоконструкцій для об'єктів підвищеної небезпеки.

3. Впровадження ризик-аналізу забезпечить нові партнерські відносини між оператором, що експлуатує потенційно небезпечні об'єкти, та регулятором – контролюючим, наглядовим органом держави.

Список літератури

1. Качинський А.Б. (2002) Розвиток проблеми ризику в Україні: теорія і практика. *Стратегічна Панорама*, 4, 14–25.
2. Тороп, V.M., Тороп, O.V. (2004) Implementation of risk analysis in the system of ensuring the integrity of main pipelines. *In: 14th international business meeting «Diagnostics 2004»*, Moscow, 81–85.
3. Горбулін В.П., Качинський А.Б. (2010) *Стратегічне планування: вирішення проблем національної безпеки*. Київ, НІСД.
4. Іванюта С.П., Качинський А.Б. (2012) *Екологічна та природно-техногенна безпека України: регіональний вимір загроз і ризиків*. Київ, НІСД.
5. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Юдина О.Н. (2019) Научный анализ рисков в жизнеобеспечении человека, общества и государства. *Проблеми аналіза ризику*, 16(2), 70–86. DOI: <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2019-16-2-70-86>
6. Закон України «Про об'єкти підвищеної небезпеки» <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14#Text>
7. Постанова Кабінету Міністрів України від 11 липня 2002 р. № 956 *Про ідентифікацію та декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки* (Офіційний вісник України, 2002 р., № 29, ст. 1357) зі змінами Постановою Кабінету Міністрів України від 13.09.2022 р. № 1030 *Деякі питання ідентифікації об'єктів підвищеної небезпеки* (Офіційний вісник України, 2022 р., № 75, ст. 4554) <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1030-2022-%D0%BF#Text> та Постановою Кабінету Міністрів України від 07.07.2023 р. №690 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/690-2023-%D0%BF#n172>
8. *Концепція управління ризиками техногенних та природних надзвичайних ситуацій*. Розпорядження Кабінету Міністрів України №37-р від 22.01.2014 р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/37-2014-%D1%80#Text>

9. *The Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*. Sendai, Japan, March 2015. <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>
10. Постанова Кабінету Міністрів України від 25.10.2017 р. № 1106 *Про виконання Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони* <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1106-2017-%D0%BF#n36>
11. Закон України «Про стандартизацію» https://zakononline.com.ua/documents/show/357896_693333
12. ДСТУ ISO Guide 73:2013 *Керування ризиком. Словник термінів*. <https://khoda.gov.ua/image/catalog/files/dstu%2073.pdf>
13. ДСТУ ISO 31000:2014 *Менеджмент ризиків. Принципи та керівні вказівки*. Нова версія від 2018 р. ДСТУ ISO 31000:2018 *Менеджмент ризиків. Принципи та настанови (ISO 31000:2018, IDT)* https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80322
14. ДСТУ ISO/IEC 31010:2013 *Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику* https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=66723 або ДСТУ EN IEC 31010:2022 *Керування ризиками – методи оцінки ризиків (EN IEC 31010:2019, IDT; IEC 31010:2019, IDT)* Дата початку дії 31.12.2023 Наказ Національного органу стандартизації ДП «УкрНДНЦ» від 28.12.2022 р. № 285.
15. (2024) *Методика визначення ризику експлуатації фізично зношених або морально застарілих зварних металоконструкцій, що не відповідають вимогам охорони праці і становлять потенційну загрозу для життя і здоров'я працюючих*. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.
16. Позняков В.Д., Дядін В.П., Давидов Є.О., Дмитрієнко Р.І. (2021) Оцінка пошкодженості суцільнозварних поздовжніх головних балок мосту ім. Є.О. Патона через р. Дніпро. *Автоматичне зварювання*, 7, 33–41. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.07.06>
17. Лобанов Л.М., Дядін В.П., Давидов Є.О., Литвиненко В.А. (2021) Вибір неруйнівних методів контролю щодо оцінки технічного стану металевих конструкцій головних балок мосту ім. Є.О. Патона через р. Дніпро у м. Києві. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 4, 47–53. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.05>
5. Makhutov, N.A., Gadenyn, M.M., Yudina, O.N. (2019) Scientific analysis of risks in life support of a person, society and state. *Problems of risk analysis*, 16(2), 70–86 [in Russian] DOI: <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2019-16-2-70-86>
6. Law of Ukraine “On objects of increased danger” <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14#Text> [in Ukrainian].
7. Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine of July 11, 2002 № 956 “On identification and declaration of safety of objects of increased danger” <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14#Text> [in Ukrainian].
8. *The concept of man-made and natural emergency risk management*. Approved by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 37 dated January 22, 2014 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/37-2014-%D1%80#Text> [in Ukrainian].
9. The Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030, Sendai, Japan, March 2015 <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>
10. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated October 25, 2017 No. 1106 “On the implementation of the Association Agreement between Ukraine, on the one hand, and the European Union, the European Atomic Energy Community and their member states, on the other hand” <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1106-2017-%D0%BF#n36> [in Ukrainian]
11. Law of Ukraine On standardization (Vedomosti Verkhovna Rada (VVR), 2014, No. 31 https://zakononline.com.ua/documents/show/357896_693333 [in Ukrainian]
12. DSTU ISO Guide 73:2013 *Risk management. Dictionary of terms*. <https://khoda.gov.ua/image/catalog/files/dstu%2073.pdf> [in Ukrainian]
13. DSTU ISO 31000:2014 *Risk management. Principles and guidelines*. New version from 2018. DSTU ISO 31000:2018 *Risk management. Principles and guidelines (ISO 31000:2018, IDT)* https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80322 [in Ukrainian]
14. DSTU ISO/IEC 31010:2013 *Risk management. General risk assessment methods* https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=66723 or DSTU EN IEC 31010:2022 *Risk management – risk assessment methods (EN IEC 31010:2019, IDT; IEC 31010:2019, IDT)*
15. (2024) *Methodology for determining the risk of operating physically worn or morally obsolete welded metal structures that do not meet the requirements of labor protection and pose a potential threat to the life and health of workers*. Kyiv, PWI [in Ukrainian].
16. Poznyakov, V.D., Dyadin, V.P., Davydov, Ye.O., Dmytrienko R.I. (2021) Evaluation of damage of all-welded longitudinal main beams of the E.O. Paton bridge across the Dniro river. *The Paton Welding J.*, 7, 30–38. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwg2021.07.06> [in Ukrainian]
17. Lobanov, L.M., Dyadin, V.P., Davydov, E.O., Lytvynenko, V.A. (2021) Selection of nondestructive testing methods for evaluation of the technical condition of metal structures of the main beams of E.O. Paton bridge across the Dniro in Kyiv. *Tekh. Diahnost. ta Neruivniv. Kontrol.*, 4, 47–53. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.05> [in Ukrainian]

References

1. Kachynsky, A.B. (2002) Development of the risk problem in Ukraine: theory and practice. *Strategic Panorama*, 4, 14–25 [in Ukrainian]
2. Torop, V.M., Torop, O.V. (2004) Implementation of risk analysis in the system of ensuring the integrity of main pipelines. In: *14th international business meeting «Diagnostics 2004»*, Moscow, 81–85.
3. Horbulin, V.P., Kachynskyi, A.B. (2010) *Strategic planning: solving national security problems*. Kyiv, NISD [in Ukrainian]
4. Ivanyuta, S.P., Kachynskyi, A.B. (2012) *Ecological and natural and man-made security of Ukraine: regional dimension of threats and risks*. Kyiv, NISD [in Ukrainian]

PRACTICE OF IMPLEMENTING THE METHODOLOGY OF RISK ANALYSIS OF THE OPERATION OF WELDED METAL STRUCTURES IN UKRAINE

V.M. Torop

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevich str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: v.torop@gmail.com

The development of standard approaches, regulatory response measures and coordinated actions at the international, regional, national and local levels is the best and perhaps the only means of influencing the risk, which can have negative consequences in the form of destruction, accidents, and catastrophes. This task requires an urgent solution, because the number of risks in the modern world is increasing. One of the main goals established by the ISO 31000 standard is the continuous improvement of risk management in organizations based on a general model designed to adapt to a wide range of risks. This publication is devoted to a historical overview of the state of affairs regarding the implementation of the risk analysis methodology in Ukraine and the practice of its use for welded metal structures. 17 Ref., 3 Fig.

Keywords: risk, standardization, integrity management, E.O. Paton bridge

Отримано 02.05.2024

Отримано у переглянутому вигляді 22.05.2024

Прийнято 11.06.2024



Міжгалузевий учбово-атестаційний центр
Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України



Програми професійної підготовки на 2024 р.

Шифр курсу	Найменування програми	Тривалість	Строки проведення
------------	-----------------------	------------	-------------------

Професійна підготовка, перепідготовка і підвищення кваліфікації кваліфікованих робітників в галузі зварювання і споріднених технологій
(з присвоєнням кваліфікації відповідно до національної і міжнародної кваліфікаційних систем)

Курсова підготовка ЗВАРНИКІВ:

301	ручного дугового зварювання покритими електродами (MMA) (з присвоєнням національної і міжнародної кваліфікації)	9 тижнів (356 г)	постійно, (індивідуальна підготовка за модульною технологією)
302	ручного дугового зварювання неплавким металевим електродом в інертних газах (TIG) (з присвоєнням національної і міжнародної кваліфікації)	5 тижнів (192 г)	
304	механізованого дугового зварювання плавким електродом в захисних газах (MIG/MAG) (з присвоєнням національної і міжнародної кваліфікації)	7 тижнів (276 г)	
306	автоматичного дугового зварювання під флюсом / в захисних газах	3 тижня (112 г)	
308	контактного (пресового) зварювання рейок з атестацією відповідно до ДСТУ EN 14732	3 тижня (112 г)	
309	пластмас (зварювання трубопроводів з поліетиленових труб) з атестацією відповідно до ДСТУ EN 13067	5 тижнів (196 г)	

Підготовка зварників по програмах Міжнародного інституту зварювання із присвоєнням кваліфікації:

310	Міжнародний зварник кутових швів (IFW) з атестацією по EN ISO 9606-1	130 – 210 г ²	постійно, (індивідуальна підготовка за модульною технологією)
312	Міжнародний зварник плоских з'єднань (IPW) з атестацією по EN ISO 9606-1	250 – 380 г ²	
315	Міжнародний зварник труб (ITW) з атестацією по EN ISO 9606-1	360 - 510 г ²	
318	Міжнародний практик-зварник (IWP) з атестацією по EN ISO 9606-1	35 - 153 г ²	

Перепідготовка ЗВАРНИКІВ із присвоєнням кваліфікації «Міжнародний зварник»: (IFW, IPW, ITW)

321	перепідготовка зварників ручного дугового зварювання покритими електродами (MMA) з атестацією по ДСТУ EN ISO 9606-1	76-112 ²	постійно, (індивідуальна підготовка за модульною технологією)
322	перепідготовка зварників механізованого дугового зварювання плавким електродом в захисних газах (MIG/MAG) з атестацією по ДСТУ EN ISO 9606-1	76-112 г ²	
323	перепідготовка зварників ручного дугового зварювання неплавким металевим електродом в інертних газах (TIG) з атестацією по ДСТУ EN ISO 9606-1	76-112 г ²	

Підвищення кваліфікації ЗВАРНИКІВ:

330	ручного дугового зварювання покритими електродами	2 тижня (72 г)	постійно, (індивідуальна підготовка за модульною технологією)
331	ручного дугового зварювання неплавким металевим електродом в інертних газах	2 тижня (72 г)	
333	механізованого дугового зварювання плавким електродом в захисних газах (MIG/MAG)	2 тижня (72 г)	
334	механізованого дугового зварювання порошковим дротом	2 тижня (72 г)	

Курсова підготовка контролерів неруйнівного контролю:

343	Спеціалізація – візуально-оптичний контроль	72/196 г ³	індивідуальна підготовка за узгодженням з замовником
344	Спеціалізація – радіографічний контроль	72/196 г ³	
345	Спеціалізація – ультразвуковий контроль	72/196 г ³	
346	Спеціалізація – магнітопорошковий контроль	72/196 г ³	
347	Спеціалізація – капілярний контроль	72/196 г ³	

Атестація персоналу з неруйнівного контролю

421	Спеціальна підготовка дефектоскопістів до сертифікації згідно з ДСТУ EN 9712	ультразвуковий контроль	32/36 / 64 (I рів) г ⁴	індивідуальна підготовка за замовником з замовником
423			40/48 / 72/80 / 144 (II рів) г ⁴	
427		радіографічний контроль	36/40 72 (I рів) г ⁴	
430			40/48 / 76/80 / 152 (II рів) г ⁴	
433		візуально-оптичний контроль	16/20 / 30 (I рів) г ⁴	
436	20/24 / 35/40 / 70 (II рів) г ⁴			

Україна, 03150, м. Київ, вул. Антоновича, 56 Тел. (044) 294-61-65; 294-61-67, 200-82-80, 200-81-09,
E-mail: paton_muac@ukr.net, http://muac.kpi.ua

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕФЕКТОСКОП КОНТРОЛЮЄ ЗАЛІЗНИЧНІ РЕЙКИ В ТУРЕЧЧИНІ

20–23 березня 2024 р. у м. Анкара (Туреччина) компанія OKOndt GROUP (Україна) провела тренінг для фахівців компанії BURAY з питань використання обладнання для неруйнівного контролю, що випускає українська компанія та яке придбала турецька сторона. Це дворельсовий вихрострумний дефектоскоп ETS2-73.

У тренінгу брали участь:

- представники покупця BURAY (Туреччина) – 5 фахівців;
- представники турецького партнера ULUTEPE DEMIRYOLY MAKINALARI – 2 фахівця;
- представники продавця OKOndt GROUP – 3 фахівця.

Навчання проводили представники OKOndt GROUP. Були розглянуті такі питання:

- налаштування дефектоскопу, калібрування на зразку з дефектами;
- контроль залізничних рейок;
- аналіз результатів контролю на ПК.

За фактом проведеного навчання були видані сертифікати про проходження тренінгу фахівцям – представникам замовника.

Вихрострумний дворейковий дефектоскоп ETS2-73, що представила компанія OKOndt GROUP, призначений для виявлення та оцінки глибини поверхневих тріщин на поверхні кочення головки залізничної рейки. Він дозволяє виконувати вихрострумний контроль рейок відповідно до вимог EN 16729-2 Non-destructive testing on rails in track - Part 2: Eddy current testing of rails in track, дає можливість контролю як рейкового шляху, так і стрілочних переходів; вибіркового контролю окремих ділянок рейкового шляху; контроль і оцінку наявності поверхневих дефектів після зачисних машин; контроль всіх основних рейкових профілів: P50, P65, 49E1, UIC 60 та ін.

Переваги ETS2-73:

- обладнання дефектоскопа ETS2-73 відповідає вимогам ISO 15548-1 і ISO 15548-2;
- дефектоскоп виявляє наступні поверхневі дефекти: втомні поперечні тріщини, гартові тріщини, відшарування робочої грані, місця пробуксовок коліс;
- алюмінієва рама, що складається;
- одночасний контроль лівої та правої рейки;
- конструкція дефектоскопа дозволяє відстежувати та налаштовуватись під поточну ширину шляху;
- спеціалізовані ВСП (вихрострумні перетворювачі) із захисними зносостійкими протекторами дозволяють оцінювати глибину вертикального пошкодження рейки до 3 мм і не бояться за цілісність перетворювача;
- застосування 8-ми ВСП дозволяє виконувати контроль всієї поверхні головки рейки за один прохід;
- можливість переїзду болтових стиків рейки з відстанню між рейками до 15 мм;
- індивідуальна пружна підвіска кожного ВСП;
- час роботи від акумуляторної батареї — не менше 8 годин.

Спеціалізоване програмне забезпечення дефектоскопа ETS2-73 дозволяє проводити швидке налаштування вихрострумних каналів Eddyson D – частоту, напругу генератора, підсилення, фільтри, пороговий рівень та ін.; створення калібрувальних кривих і налаштувань для оцінки глибини вертикального пошкодження; збереження налаштувань у пам'яті ПК.

Продукція OKOndt GROUP показала свій високий технічний рівень та конкурентоспроможність на світовому ринку, викликала великий інтерес у представників замовника. Все це сприяло встановленню нових ділових контактів із закордонними замовниками у залізничній галузі.



ГАЛУЗЕВА КОНФЕРЕНЦІЯ З НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ В АВІАЦІЇ

10 травня 2024 р. у м. Сарсана (Італія) відбулася VIII галузева конференція та виставка, метою якої був аналіз сучасного стану неруйнівного контролю (НК) в авіації. Конференція вперше відбулася в ангарі бази гелікоптерів ВМС Італії, що підкреслило її галузеве спрямування та дало можливість отримати доступ до виробничої діяльності підприємства в галузі НК. Організацію конференції взяли на себе Італійське Товариство НК у співпраці з Національним аерокосмічним комітетом з НК і міжнародним холдингом «Leonardo», основними регіонами діяльності якого є: Італія (55 підприємств), США (32 підприємства), Великобританія (7 підприємств), Польща (завод з виробництва гвинтокрилів «PZL-Świdnik») і 11 підприємств в інших країнах.

Доповідачі обговорили найбільш інноваційні методології НК, спрямовані на рішення найскладніших проблем галузі. Особливий акцент був зроблений на нові технології вихрострумове НК, бо цей метод займає чільне місце при проведенні експлуатаційного НК авіаційних конструкцій. Крім того, значну увагу приділено проблемам застосування в галузі комп'ютерної томографії та НК деталей у процесі адитивного виробництва.

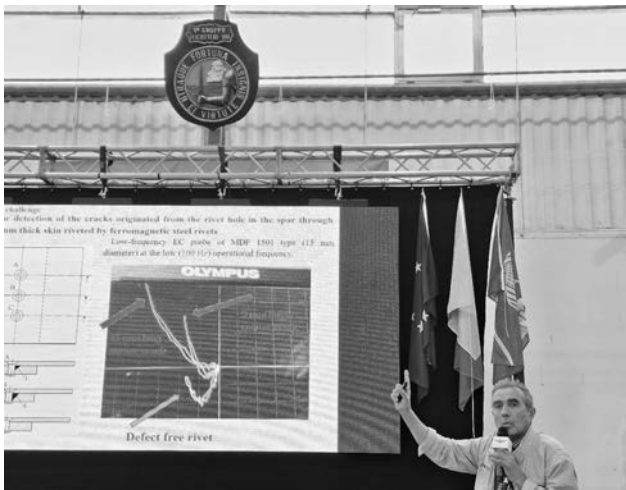
Доповідь «Detection of hidden subsurface defects in aircraft structures by eddy current probes of

double-differential type» (V. Uchanin, G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine; G. Nardoni, M. Feroldi, I&T Nardoni Institute; M. Turconi, Leonardo Division) стосувалась проблеми виявлення прихованих підповерхневих дефектів в авіаційних конструкціях вихрострумовими перетворювачами подвійного диференціювання. Особливу цікавість учасників конференції викликали результати щодо виявлення дефектів через обшивку завтовшки 5 мм у зоні сталевих заклепок, які створюють надзвичайно великий рівень завад. Селективне виділення сигналів, створених тріщинами у другому шарі конструкції на фоні впливу сталевих заклепок, вдалося реалізувати тільки на дуже низькій робочій частоті 100 Гц. Відповідні сигнали наведено в доповіді (див. фото). Це, можливо, перший випадок успішного застосування таких низьких робочих частот. Створені в Україні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання діаметром 15 мм з дефектоскопом фірми «Olympus» дозволили успішно реалізувати таку інноваційну технологію контролю на основі досліджень зразків, які підготовлено фірмою «Leonardo Division» (входить у холдинг «Leonardo»).

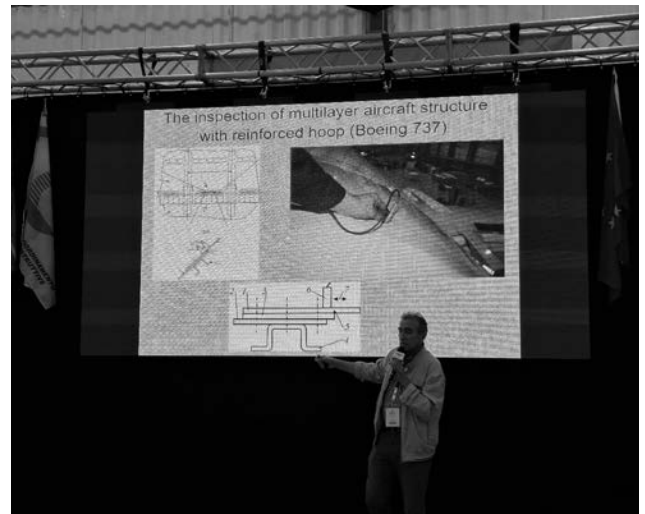
Доповідь викликала жвавий інтерес учасників, що позначилось на збільшенні відвідува-



В.М. Учанін демонструє Ф. Серафіні спільні українсько-італійські розробки з вихрострумове контролю



Вид сигналів на екрані дефектоскопа фірми OLYMPUS, які створено тріщинами на фоні впливу сигналу від бездефектної заклепки



Технологія виявлення дефекту на зворотній стороні обшивки в зоні впливу краю підсилювального поясу



Учасники конференції – почесний президент міжнародної Академії НК Д. Нардоні, голова італійського товариства НК С. Турбероза та експерт з вихрострумового контролю Ф. Серафіні

чів стенду, де заявлені технології контролю було продемонстровано на зразках, що імітують найскладніші проблеми виявлення захованих дефектів у багатошарових вузлах. Продуктивною була, зокрема, дискусія з П. Роман, яка є власницею і генеральним менеджером німецької фірми «Rohmann GmbH», і керівником департаменту розвитку фірми доктором А. Гопаланом. Ця фірма є провідним виробником засобів вихрострумового контролю Німеччини. Наші вихроструміві перетворювачі чудово показали себе під час підключення до найсучаснішого вихрострумового дефектоскопу фірми типу ELOTEST M6. Обго-

ворювались можливості та перспективи спільних проєктів, зокрема, в рамках програм НАТО.

Результати конференції показали доцільність проведення заходів такого формату, який концентрує увагу учасників на проблемах конкретної галузі, не розпоршуючи увагу на проблеми інших галузей промисловості. Це дозволило за короткий час розглянути найважливіші досягнення НК авіаційної галузі та сформувані напрямки подальшого розвитку. Є доцільним Українському Товариству НК і ТД поширити досвід проведення галузевих конференцій такого формату у співпраці з підприємствами України.

В. Учанін, Д. Нардоні, Н. Коміні



**НОВИНИ УКРАЇНСЬКОГО ТОВАРИСТВА
НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ**
члена Європейської Федерації з неруйнівного контролю
члена Міжнародного комітету з неруйнівного контролю



ВІТАЄМО Голову УТ НКТД професора
ВОЛОДИМИРА ОЛЕКСАНДРОВИЧА ТРОЇЦЬКОГО
з присудженням почесного звання «Винахідник року»
Національної академії наук України
та відзнаки Вченої Ради
Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
**«За видатні наукові та науково-технічні досягнення,
з нагоди 90-річчя ІЕЗ ім. Є.О. Патона»**

Професор В.О. Троїцький очолює відділ «Неруйнівні методи контролю якості зварних з'єднань» з 1967 року. За цей час ним створено теоретичні основи намагнічування складних деталей, у різних галузях промисловості впроваджено ряд магнітних дефектоскопів на основі рухомих намагнічуючих пристроїв, створено комплекси для цифрової безплівкової радіографії, розроблено унікальні методики та прилади для неординарних завдань дефектоскопії: автоматизований УЗК поздовжніх і кільцевих швів з роздільною фіксацією дефектів шва і зон термічного впливу та точним спостереженням за віссю зварного шва, апаратура для УЗК зварних з'єднань арматури, способи для пошарового контролю товстостінних конструкцій, пристрої для запам'ятовування і аналізу результатів УЗК, застосування методів TOFD, SAFT для точного визначення розмірів внутрішніх дефектів, заснованих на ефекті дифракції хвиль і математичних методів побудови штучних апертур.

Останні роки професор В.О. Троїцький працює над новими ідеями: потрубного коду-

вання трубопроводів, низькочастотного УЗК протяжних об'єктів без сканування їх поверхні, тангенціальним просвічуванням труб, рухомими дистанційними R-перетворювачами, створенням мобільних портативних скануючих рентгенотелевізійних систем.

У воєнний час колектив, який очолює В.О. Троїцький, виконує роботи з:

- рентгенотелевізійного контролю снарядів, мін на заповнення їх вибуховими речовинами;
- моніторингу резервуарів із паливно-мастильними матеріалами;
- вимірювання товщини та залишкових напружень стволів гармат і мінометів;
- оцінки якості бронепластин;
- виготовлення напівавтоматичних широкозахватних міношукачів з реверсивним електроприводом;
- виготовлення рухомих приладів для пошуку постраждалих під завалами зруйнованих будинків людей та задля об'єктивної оцінки заданої шкоди;
- розробки алгоритмів задля запобігання ураження дронів засобами ППО противника;



Директор ІЕЗ ім. Є.О. Патона академік І.В. Кривцун нагороджує В.О. Троїцького відзнакою «Винахідник року»



З Борисом Євгеновичем Патоном



І.В. Кривцун, В.О. Троїцький, Б.Є. Патон, Л.М. Лобанов,
І.М. Клочков



З членами Міжнародної академії неруйнівного контролю



З Президентом Міжнародної академії НК Giuseppe Nardoni



З Президентом Європейської федерації з неруйнівного контролю Mike Farley



З Головою Технічного комітету ISO/TC 135 Hajime Hatano



– розробки алгоритмів пошуку мінних полів за допомогою дронів.

Під його керівництвом розроблено та погоджено більш як 60 стандартів з неруйнівного контролю.

В.О. Троїцький видав друком шість навчальних посібників з основних методів неруйнівного контролю, підготував 14 кандидатів технічних

наук, написав 12 книг, понад 800 друкованих праць і патентів, а його статті публікують світові професійні видання США, Великої Британії, Японії та інших країн.

Проф. В.О. Троїцький багато років є членом редколегії британського журналу «INSIGHT», заступником головного редактора журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», членом ряду вчених рад, заступником голови Технічного комітету зі стандартизації ТК-78 «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», є членом Міжнародної академії неруйнівного контролю, багатьох національних товариств з НК, зокрема США, Великої Британії, Німеччини та інших країн, працює в Міжнародному комітеті з НК, Європейській федерації з НК, бере участь у підготовці фахівців за програмами IAEA, є членом ISO/TC 135 «Non-destructive testing».

ВІТАЄМО НОВИХ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЧЛЕНІВ УТ НКТД

▪ Багрова Валерія Анатолійовича

к.т.н., доцента кафедри технології металів та матеріалознавства імені О.М. Петриченка Харківського національного автомобільно-дорожного університету

▪ Берлова Івана Андрійовича

інженера-дефектоскопіста ТОВ «ВО «ОСКАР», м. Нікополь

▪ Дощечкіну Ірину Василівну

к.т.н., професорку кафедри технології металів та матеріалознавства імені О.М. Петриченка Харківського національного автомобільно-дорожного університету

▪ Дудукалова Юрія Володимировича

к.т.н., професора кафедри технології металів та матеріалознавства імені О.М. Петриченка Харківського національного автомобільно-дорожного університету

▪ Левінського Олега Олександровича

директора ТОВ «Сертифікаційний центр», м. Черкаси

▪ Протасенко Тетяну Олександрівну

к.т.н., доцентку кафедри технології металів та матеріалознавства імені О.М. Петриченка Харківського національного автомобільно-дорожного університету

▪ Рупіча Сергія Сергійовича

к.т.н., асистента кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

▪ Самойліченко Ольгу Вікторівну

к.т.н., доцентку кафедри комп'ютеризованих систем управління Національного авіаційного університету, м. Київ

▪ Трошинського Богдана Олександровича

к.т.н., доцента Київського національного університету будівництва та архітектури

▪ Чигрина Анатолія Олександровича

асистента кафедри технології металів та матеріалознавства імені О.М. Петриченка Харківського національного автомобільно-дорожного університету

▪ Чубукіна Олександра Сергійовича

к.т.н., доцента Харківського національного університету радіоелектроніки

Підтвердили членство в УТ НКТД на новий термін:

▪ Васильковська Інна Олегівна

к.т.н., старша викладачка кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

▪ Глушкова Діана Борисівна

д.т.н., професорка, завідувачка кафедри технології металів та матеріалознавства імені О.М. Петриченка Харківського національного автомобільно-дорожного університету

▪ Городжа Анатолій Дмитрович

к.т.н., професор Київського національного університету будівництва та архітектури

▪ Кравець Віктор Павлович

заступник генерального директора з якості та управління ВП «Рівненська АЕС» ДП НАЕК «ЕНЕРГОАТОМ», м. Вараш

▪ Кубай Микола Михайлович

керівник відділу ТзОВ «Кипер-Пласт», м. Львів

▪ Рижков Юрій Володимирович

к.т.н., директор ТОВ СКТБ «Гідромодуль», м. Харків

Знайомство з членами УТ НКТД

КАФЕДРА «АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА СИСТЕМ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ» НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кафедру автоматизації та систем неруйнівного контролю (АСНК) організовано на Приладобудівному факультеті у 2021 р. шляхом об'єднання науковців та викладачів кафедри приладів і систем неруйнівного контролю (ПСНК) і кафедри приладобудування (ПБ).

Кафедру ПСНК було засновано у 1981 р. проф. С.М. Маєвським. Вона стала першою створеною в Україні кафедрою, яка почала готувати спеціалістів, здатних розробляти та обслуговувати сучасні комп'ютерні системи контролю якості продукції та системи технічної і медичної діагностики. З 1981 по 2006 рр. кафедру очолював Станіслав Михайлович Маєвський, д.т.н., проф., академік Академії інженерних наук (АІН) України, заслужений проф. НТУУ «КПІ». З 2006 по 2021 рр. кафедру очолював д.п.н., проф. Анатолій Георгійович Протасов.

Значний внесок у становлення та розвиток кафедри ПСНК зробили і співробітники НАН України – проф., д.т.н. В.О. Троїцький; проф., д.ф.-м.н. Д.Ф. Байса; проф., д.м.н. Д.С. Лященко, а також академік НАН України проф., д.т.н. В.П. Бабак.

Викладачами та співробітниками кафедри вперше була створена ультразвукова фазокерована ґратка та ультразвуковий (2,25 МГц) томограф-дефектоскоп на її основі з двомірним відображенням розподілу градієнтів густини типу Б-скан, який знайшов ефективне застосування для візуалізації внутрішньої структури як у промисловості, так і в меди-

цині. Силами аспірантів, викладачів і студентів кафедри розроблено скануючий ультразвуковий (100 МГц) мікроскоп-дефектоскоп для контролю якості внутрішньої структури виробів із конструкційної кераміки та інших матеріалів. Система вирізнялася на той час високою роздільною здатністю (1...5 мкм) і зручним зональним (кольоровим) відображенням акустичних зображень зрізів внутрішньої структури, що робило її застосування ефективним у багатьох сферах.

Кафедру ПБ було засновано 1961 р., а першим завідувачем був доц. О.Д. Трубенюк. На той час це була перша кафедра в Україні, що готувала інженерів за фахом «Прилади точної механіки» для потреб різних галузей промисловості України, особливо для оборонної та космічної. Значний внесок у становлення та розвиток кафедри ПБ зробили к.т.н., доц. І.В. Сидорко, зав. лаб. І.П. Дубінець, ст. викладач Ю.І. Горковчук, навчальний майстер Н.С. Будняк.

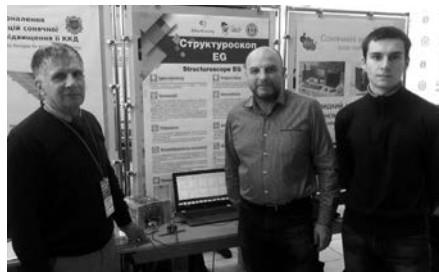
Науково-дослідницька діяльність кафедри ПБ розвивалась у кількох напрямках. Творчий колектив, очолюваний к.т.н., доц. П.М. Таланчуком, займався розробкою газоаналізаторів, твердоелектролітних сенсорів, вторинної апаратури. Проблемами вимірювання параметрів вібрації, витрати, тиску, рівнів рідини займалися науковці під керівництвом к.т.н., доц. І.В. Сидорка. Підвищенням точності елементів приладів авіаційно-ракетних



Викладачі та співробітники кафедри «Автоматизації та систем неруйнівного контролю», 2022 р.



Кафедра у складі університетських учасників виставки «Зброя і безпека» (2021 р.)



Команда фіналістів конкурсу стартап-проектів Sikorsky Challenge (доц. В.Г. Баженов, асп. Ю.О. Каленіченко, асп. С.С. Рацебарський, 2018 р.)



Комісія на захисті магістрів (проф. О.М. Безвесільна, проф. І.Ю. Черпанська, зав. каф. проф. Ю.В. Киричук, проф. Ю.В. Куц, 2023 р.)

комплексів займалися науковці під керівництвом О.Д. Трубенка. За період свого існування кафедра активно співпрацювала з профільними інститутами НАН України, провідними підприємствами та міжнародними інституціями. Було засновано науково-дослідний центр «СПЕКТР», що займався проблемами вимірювання парціального тиску газів і розробкою твердоелектролітних сенсорів.

Сьогодні кафедра АСНК поєднує в собі досвід висококваліфікованих фахівців у багатьох сферах науки і техніки: інформаційних технологій у приладобудуванні, роботизації систем у галузі неруйнівного контролю, технічної і медичної діагностики, автоматизованого обліку вантажних перевезень, енергозбереження, вібромоніторингу та вібродіагностики стану складних систем тощо.

Завідувачем кафедри АСНК є д.т.н., проф. Юрій Володимирович Киричук. У Київському політехнічному інституті він пройшов шлях від студента до завідувача кафедри. У 2016 р. захистив докторську дисертацію на тему «Автоматизована приладова інформаційно-вимірювальна система». Наукові інтереси: сучасні системи ударо- та віброзахисту навігаційних комплексів рухомих об'єктів, роботизовані системи, біоподібні роботи, інтернет речей.

Кафедра АСНК входить до складу приладобудівного факультету та проводить навчання бакалаврів, магістрів професійного і наукового спрямувань, аспірантів (Ph.D.) за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Для студентів під час навчання є доступними до вибору такі сертифікатні програми: «Роботизовані і автоматизовані системи неруйнівного контролю та діагностики», «Мехатронні комплекси контролю та діагностики», «Комп'ютерно-інтегровані технології та системи в енергозбереженні». Кафедра готує самодостатніх фахівців з найважливіших та найперспективніших напрямів сучасної галузі автоматизації у приладобудуванні – проектування мехатронних і робототехнічних

систем, засобів інтелектуального контролю та діагностики, розробка методів і засобів вимірювання та контролю параметрів технологічних процесів, систем неруйнівного контролю, технічної та медичної діагностики.

На кафедрі працюють визнані спеціалісти в області приладобудування, неруйнівного контролю та технічної діагностики. Досвід і набуті навички в проведенні наукової, дослідницької та педагогічної роботи професори та доценти кафедри передають молодим науковцям і аспірантам, що продовжують славетні традиції об'єднаних кафедр ПБ і ПСНК. На сьогодні до складу кафедри входять 6 професорів, 11 доцентів, 2 старших викладача та 4 асистенти.

Актуальними науковими напрямками, якими займаються викладачі кафедри, є автоматизація процесів у приладобудуванні, розробка робототехнічних комплексів та інтелектуальних пристроїв, розробка та впровадження комп'ютерно-інтегрованих систем технічної і медичної діагностики, створення пристроїв і систем неруйнівного контролю, енергозбереження тощо.

Професор кафедри, заслужений діяч науки і техніки України, О.М. Безвесільна є однією з лауреатів Державної премії України у 2016 р. за роботу «Приладовий комплекс стабілізатора озброєння легкої броньованої техніки». Приладові комплекси стабілізаторів призначені для автоматичного наведення блока озброєння на наземні та повітряні цілі, що маневрують, розширюючи бойові можливості легкої броньованої техніки. Ця інноваційна розробка значно підвищує точність і знижує вартість порівняно з закордонними аналогами, а коефіцієнт корисної дії системи становить 67 %. Вже впроваджено 250 нових комплексів стабілізаторів озброєння, зокрема в зоні АТО – понад сто комплексів. Результати експлуатації в різних умовах показали переваги нового приладового стабілізатора над закордонними аналогами.

Однією з останніх успішних розробок кафедри є «Структуроскоп ЕО», який був пред-



Доц. Р.М. Галаган і проф. Ю.В. Куц під час виконання експериментів, 2024 р.



Отримання відзнаки від Національної академії наук України (доц. Ю.Ю. Лисенко, академік НАНУ В.П. Горбулін, проф. А.Г. Протасов), 2019 р.



Робота з аспірантами (О.А. Повшенко та доц. В.Г. Баженов), 2019 р.

ставлений на конкурсі стартап-проектів «Sikorsky Challenge – 2018». Дана розробка дозволяє аналізувати кристалічну ґратку матеріалів і представляти результати контролю у вигляді «Паспорта електронної структури матеріалу об'єкта контролю». Проект отримав патенти на винаходи та подання на патенти у країнах ЄС. Команда розробників проекту складалася з науковців, викладачів, аспірантів і студентів кафедри, а очолив її доцент кафедри АСНК В.Г. Баженов. Ще раніше наукові досягнення В.Г. Баженова отримували визнання на міжнародному рівні, зокрема, на Міжнародному салоні винаходів та нових технологій «Новий час» і Фестивалі інноваційних проектів «Sikorsky Challenge» минулих років. Проте проект «Структроскоп EG» отримав грантову підтримку від Фонду науково-технічного розвитку України ім. акад. В.С. Михалевича, чим відкрив шлях для подальшого розвитку та впровадження його у виробництво.

У рамках наукових досліджень на кафедрі АСНК проводяться розроблення методів удосконалення визначення характеристик дефектів багатшарових матеріалів за результатами активного теплового контролю. Так, доц. Р.М. Галаганом та аспірантом, а в подальшому Ph.D. (2020 р.), А.С. Момотом було розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для вдосконалення методу визначення характеристик дефектів багатшарових матеріалів за результа-

тами активного теплового контролю. Використання вдосконаленого методу на базі неймережових технологій дозволило автоматизувати класифікацію дефектів, підвищити точність теплової дефектометрії та достовірність контролю порівняно з існуючими методами. Розроблено віртуальний інтерфейс користувача для проведення дефектометрії та аналізу теплових томограм, що покращило ефективність аналізу результатів контролю. Система також включає експериментальний стенд і дослідні зразки для проведення активного теплового контролю та відпрацювання програмних алгоритмів, що підтверджує ефективність удосконаленого методу визначення характеристик дефектів.

Отримані під час навчання знання та навички випускники кафедри застосовують при роботі в організаціях, що займаються розробкою, виготовленням, реалізацією, обслуговуванням комп'ютерних систем неруйнівного контролю, систем енергозбереження, робототехнічних комплексів тощо. Випускники володіють широким набором умінь і навичок, що дозволяє їм працевлаштовуватись у сфері інформаційних технологій (створення програмних продуктів і застосунків), технічної діагностики (діагностика стану технічних об'єктів для потреб авіації, залізниць, машинобудування та ін.) та охорони здоров'я (системи медичної діагностики).

Кафедра є учасником програми співпраці з вищими навчальними закладами київського під-



Заняття в лабораторії електроніки Melexis, 2019 р.



Заняття в комп'ютерному класі, 2020 р.



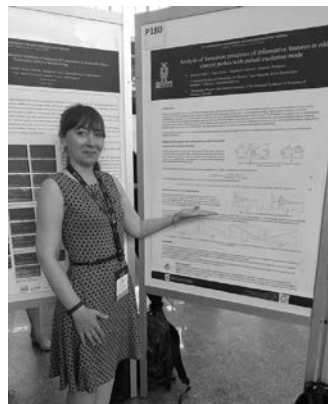
На заняттях гуртка з робототехніки, 2023 р.



Заняття з 3D друку в лабораторії «Ажах», 2024 р.



Майстер клас з паяння від асп. О. Повшенка, 2023 р.



Доц. Ю.Ю. Лисенко на Європейській конференції з НК в Гетеборзі, 2023 р.



Ю.В. Куц, Ю.Ю. Лисенко, О.В. Лашко, А.Г. Протасов на конференції NDT-UA, Польща, 2017 р.



Студенти кафедри АСНК на саміті «Woman in tech», 2022 р.

розділу компанії «Melexis N.V.» (Бельгія) ДП «Мелексіс-Україна». У рамках цієї співпраці створено лабораторію електроніки з найсучаснішим обладнанням для навчального процесу.

Однією з важливих ініціатив є співпраця кафедри з компанією «Ажах», яка надає студентам можливість отримати практичні навички у сфері механічного інженерії. На базі кафедри АСНК компанія реалізує програму інтернатури «Ажах Next», яка створена з метою підготовки студентів зі спеціальності «Mechanical Engineering» до роботи в промислових умовах. Компанією «Ажах» організовано лабораторію на кафедрі з інструментарієм та обладнанням для 3D друку, де студенти мають можливість вивчати принципи проектування конструкцій, матеріалознавство, технології обробки матеріалів і методи прототипування.

Також функціонують інші лабораторії з унікальним сучасним обладнанням – приладів і систем енергозбереження, теплового, акустичного, оптичного, електромагнітного НК, автоматизованих вимірвальних комплексів. На вимогу часу створено лабораторію робототехніки, яка користується підвищеним інтересом у студентів.

На кафедрі діє три студентських гуртки:

– науковий гурток «Робототехніка та автоматизація», де студенти проектують роботів і створюють механічні вузли з використанням 3D принтерів;

– науковий гурток «Техніка зображення» для тих, хто цікавиться фото- та відеозйомкою, об'єктивами, камерами та пристосуваннями для отримання зображень;

– соціогуманітарний гурток «Фотомистецтво» для тих, хто прагне опанувати створення фотографій на високому рівні.

Міжнародна діяльність студентів і викладачів. Кафедра входить до Всесвітньої Федерації центрів неруйнівного контролю (WFNDEC) і співпрацює з університетом Iowa State University (США), інститутом Federal Institute for Materials Research and Testing (Німеччина). Науковці та студенти кафедри постійно беруть участь у міжнародних конференціях з неруйнівного контролю, які проводяться в Україні та за її межами.

Загалом випускники кафедри є фахівцями широкого профілю, готовими до вирішення складних завдань у сфері автоматизації та неруйнівного контролю. Кафедра АСНК відіграє ключову роль у підготовці майбутніх лідерів у галузі автоматизації та контролю, робить вагомий внесок у розвиток сучасних технологій. Високий рівень підготовки випускників та активна наукова діяльність колективу кафедри сприяють розвитку інноваційних технологій та підвищенню конкурентоспроможності національної та світової промисловості.

Проф. А.Г. Протасов, доц. Ю.Ю. Лисенко

Новини в сфері стандартизації

Технічний комітет стандартизації ТК-78 підготував актуалізований перелік діючих в Україні національних стандартів з неруйнівного контролю і дотичних до цієї галузі. Загалом до нього входить 226 стандартів. З огляду на великий об'єм матеріалу, нижче публікується витяг з цього каталогу, де наведено діючі стандарти з візуального, капілярного і

магнітного методів контролю. У наступних номерах журналу планується продовжити публікацію щодо стандартів з інших методів.

В електронному вигляді повний каталог стандартів з НК доступний за запитом на e-mail: usndt@ukr.net для членів УТ НКТД, що протягом останнього річного періоду сплатили членський внесок.

№ з/п	Позначення НД	Назва НД	Метод прийняття
1	ДСТУ CEN/TR 16638:2022 (CEN/TR 16638:2014, IDT)	Неруйнівний контроль – тестування проникаючими речовинами та магнітними порошками за допомогою синього світла	підтвердження
2	ДСТУ CEN/TR 17108:2022 (CEN/TR 17108:2017, IDT)	Неруйнівний контроль – Освітлення під час проникнення та магнітопорошкового контролю, хороша практика	підтвердження
3	ДСТУ CEN/TS 17100:2022 (CEN/TS 17100:2017, IDT)	Неруйнівний контроль – Пенетрантний контроль – Еталонні фотографії та розмір індикацій	підтвердження
4	ДСТУ EN 10228-1:2017 (EN 10228-1:2016, IDT)	Неруйнівний контроль поковок зі сталі. Частина 1. Магнітопорошковий контроль	переклад
5	ДСТУ EN 10228-2:2017 (EN 10228-2:2016, IDT)	Неруйнівний контроль поковок зі сталі. Частина 2. Капілярний контроль	переклад
6	ДСТУ EN 13018:2017 (EN 13018:2016, IDT)	Неруйнівний контроль. Візуальний контроль. Загальні принципи	підтвердження
7	ДСТУ EN 13100-1:2017 (EN 13100-1:2017, IDT)	Неруйнівний контроль зварних з'єднань напівфабрикатів з термопластів. Частина 1. Візуальний контроль	підтвердження
8	ДСТУ EN 1330-10:2016 (EN 1330-10:2003, IDT)	Неруйнівний контроль. Термінологія. Частина 10. Терміни, які використовують у візуальному контролі	підтвердження
9	ДСТУ EN 1369:2022 (EN 1369:2012, IDT)	Литво. Магнітопорошковий контроль	підтвердження
10	ДСТУ EN 1371-1:2015 (EN 1371-1:2011, IDT)	Литво. Капілярний контроль. Частина 1. Відливки, виготовлені литтям в піщані форми та литтям в кокіл під дією сили тяжіння і під низьким тиском	підтвердження
11	ДСТУ EN 1371-2:2015 (EN 1371-2:2015, IDT)	Литво. Капілярний контроль. Частина 2. Відливки, отримані точним литтям	підтвердження
12	ДСТУ EN 13927:2005	Неруйнівний контроль. Контроль візуальний. Устаткування	переклад
13	ДСТУ EN 2002-16:2022 (EN 2002-16:2019, IDT)	Аерокосмічна серія. Методи випробування металевих матеріалів. Частина 16. Неруйнівний контроль. Випробування на проникнення	підтвердження
14	ДСТУ EN ISO 10893-3:2015 (EN ISO 10893-3:2011, IDT; ISO 10893-3:2011, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 3. Автоматизований контроль методом розсіювання магнітного потоку по всій окружності безшовних і зварних труб з феромагнітної сталі для виявлення поздовжніх і/або поперечних дефектів	підтвердження
15	ДСТУ EN ISO 10893-3:2015 (EN ISO 10893-3:2011, IDT; ISO 10893-3:2011, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 3. Автоматизований контроль методом розсіювання магнітного потоку по всій окружності безшовних і зварних труб із феромагнітної сталі для виявлення поздовжніх і/або поперечних дефектів	підтвердження
16	ДСТУ EN ISO 10893-5:2014	Неруйнівний контроль сталевих труб. Магнітопорошковий контроль безшовних і зварних сталевих труб для виявлення поверхневих несучільностей	підтвердження
17	ДСТУ EN ISO 12706:2016 (EN ISO 12706:2009, IDT, ISO 12706:2009, IDT)	Неруйнівний контроль. Капілярний контроль	підтвердження
18	ДСТУ EN ISO 12707:2017 (EN ISO 12707:2016, IDT; ISO 12707:2016, IDT)	Неруйнівний контроль. Магнітопорошковий контроль. Словник термінів	переклад
19	ДСТУ EN ISO 17637:2017 (EN ISO 17637:2016, IDT; ISO 17637:2016, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Візуальний контроль з'єднань, виконаних зварюванням плавленням	підтвердження

№ з/п	Позначення НД	Назва НД	Метод прийняття
20	ДСТУ EN ISO 17638:2018 (EN ISO 17638:2016, IDT; ISO 17638:2016, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Магнітопорошковий контроль	підтвердження
21	ДСТУ EN ISO 23277:2018 (EN ISO 23277:2015, IDT; ISO 23277:2015, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Капілярний контроль. Рівні приймання	підтвердження
22	ДСТУ EN ISO 23278:2018 (EN ISO 23278:2015, IDT; ISO 23278:2015, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Магнітопорошковий контроль. Рівні приймання	підтвердження
23	ДСТУ EN ISO 3059:2016 (EN ISO 3059:2012, IDT; ISO 3059:2012, IDT)	Неруйнівний контроль. Капілярний та магнітопорошковий контроль. Умови огляду	підтвердження
24	ДСТУ EN ISO 3452-1:2022 (EN ISO 3452-1:2021, IDT; ISO 3452-1:2021, IDT)	Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 1. Загальні принципи	підтвердження
25	ДСТУ EN ISO 3452-2:2022 (EN ISO 3452-2:2021, IDT; ISO 3452-2:2021, IDT)	Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 2. Випробування пенетрантів	підтвердження
26	ДСТУ EN ISO 3452-3:2014	Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 3. Контрольні випробувальні зразки	підтвердження
27	ДСТУ EN ISO 3452-4:2008	Неруйнівний контроль. Контроль капілярний. Частина 4. Устаткування	переклад
28	ДСТУ EN ISO 3452-5:2014	Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 5. Капілярний контроль при температурах понад 50°C	підтвердження
29	ДСТУ EN ISO 3452-6:2014	Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 6. Капілярний контроль при температурах нижче 10°C	підтвердження
30	ДСТУ EN ISO 6520-1:2015 (EN ISO 6520-1:2007, IDT; ISO 6520-1:2007, IDT)	Зварювання та споріднені процеси. Класифікація геометричних дефектів у металевих матеріалах. Частина 1. Зварювання плавленням	підтвердження
31	ДСТУ EN ISO 6520-2:2015 (EN ISO 6520-2:2013, IDT; ISO 6520-2:2013, IDT)	Зварювання та споріднені процеси. Класифікація геометричних дефектів у металевих матеріалах. Частина 2. Зварювання тиском	підтвердження
32	ДСТУ EN ISO 9934-1:2018 (EN ISO 9934-1:2016, IDT; ISO 9934-1:2016, IDT)	Неруйнівний контроль. Магнітопорошковий контроль. Частина 1. Загальні вимоги	підтвердження
33	ДСТУ EN ISO 9934-2:2015 (EN ISO 9934-2:2015, IDT; ISO 9934-2:2015, IDT)	Неруйнівний контроль. Магнітопорошковий контроль. Частина 2. Засоби контролю	підтвердження
34	ДСТУ EN ISO 9934-3:2015 (EN ISO 9934-3:2015, IDT; ISO 9934-3:2015, IDT)	Неруйнівний контроль. Магнітопорошковий контроль. Частина 3. Обладнання	підтвердження
35	ДСТУ EN ISO 10893-4:2015 (EN ISO 10893-4:2011, IDT; ISO 10893-4:2011, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 4. Капілярний контроль сталевих безшовних зварних труб для виявлення поверхневих дефектів	підтвердження
36	ДСТУ ISO 11971:2016 (ISO 11971:2008, IDT)	Сталеve і чавунне литво. Візуальне контролювання якості поверхні	підтвердження
37	ДСТУ ISO 19959:2016 (ISO 19959:2005, IDT)	Візуальне контролювання стану поверхні відливків, виплавлених по моделях. Сталеві, нікелеві й кобальтові сплави	підтвердження
38	ДСТУ ISO 3057:2016 (ISO 3057:1998, IDT)	Контроль неруйнівний. Металографічний метод реплік для обстеження поверхні	підтвердження
39	ДСТУ ISO 3058:2016 (ISO 3058:1998, IDT)	Контроль неруйнівний. Допоміжні засоби для візуального контролю. Вибір луп з малою кратністю збільшення	підтвердження
40	ДСТУ ISO 4986:2015 (ISO 4986:2010, IDT)	Сталеві відливки. Магнітопорошковий контроль	підтвердження
41	ДСТУ ISO 4987:2015 (ISO 4987:2010, IDT)	Сталеві відливки. Капілярний контроль	підтвердження

Міжнародні новини

18 квітня 2024 р. відбулось засідання Генеральної асамблеї Європейської федерації з неруйнівного контролю (EFNDT). У засіданні, що проходило в online-форматі, взяли участь представники з близько 20 європейських країн-членів. Українське товариство НКТД представляли голова проф. В.О. Троїцький і заступник голови к.т.н. М.Л. Казакевич.

На засіданні було розглянуто звіт Ради директорів, затверджено фінансовий звіт і бюджет, звіти комітетів (СЕС) і робочих груп (WG), презентації національних товариств, звіт оргкомітету Європейської конференції з НК ECNDT-2026.

Загальна місія EFNDT полягає в тому, щоб об'єднати ресурси окремих національних товариств і організацій у сфері НК у Європі для створення ефективнішого та ціннішого голосу для індустрії НК, професії НК, користувачів НК і широкої спільноти.

Відповідно до цієї місії EFNDT просуває в усіх країнах європейського географічного простору всі аспекти наукового та навчально-го характеру НК, включаючи технології, дослідження, застосування, навчання та загальну інформацію, а також вживає заходів, спрямованих на підвищення надійності НК.

На сьогоднішній день EFNDT налічує 29 повних членів-національних товариств НК з Австрії, Бельгії, Болгарії, Хорватії, Чехії, Данії, Фінляндії, Франції, Німеччини, Греції, Угорщини, Італії, Латвії, Литви, Молдови, Ні-

дерландів, Норвегії, Польщі, Португалії, Румунії, Сербії, Словаччини, Словенії, Іспанії, Швеції, Швейцарії, Туреччини, Великої Британії і України, а також 4 асоційованих члени – з Індії, Ізраїлю, Японії та Сінгапуру.

З моменту свого створення в 1998 р. EFNDT невтомно працює над просуванням використання неруйнівних технологій у Європі, щоб таким чином гарантувати якість і безпеку в компаніях. EFNDT співпрацює з європейськими та міжнародними організаціями, щоб охопити всі можливі країни та аудиторію.

Робочі групи EFNDT: WG1 – Освіта, WG2 – Радіаційний захист, WG3 – Моніторинг технічного стану, WG4 – Акредитація лабораторій, WG5 – НК для громадської безпеки, WG6 – НК в адитивному виробництві, WG7 – Аналіз невідповідностей, WG8 – Людський фактор, WG9 – Етика, WG10 – NDE 4.0.

Робочі групи дозволяють членам обмінюватися інформацією та знаннями в професійному та спільному середовищі. Завдяки командній роботі експертів з неруйнівного контролю можна вирішувати найскладніші проблеми неруйнівного контролю.

Важливість робочих груп для НК і EFNDT можна підсумувати таким чином:

Обмін знаннями та досвідом: Робочі групи надають експертам платформу для обміну своїми знаннями, досвідом і думками, пов'язаними з конкретними напрямками НК. Об'єд-



нуючи професіоналів із різним досвідом, ці групи сприяють обміну ідеями, методологіями та практичними прикладами. Це середовище для співпраці допомагає покращити загальне розуміння НК і сприяє розробці нових методів і стандартів.

Стандартизація та гармонізація: Робочі групи відіграють життєво важливу роль у розробці та вдосконаленні стандартів і настанов НК. Вони сприяють створенню найкращих практик і забезпечують одноманітність і послідовність процедур контролю.

Дослідження та розробки: Робочі групи часто беруть участь у дослідницьких проєктах для вирішення конкретних проблем у НК. Завдяки колективному досвіду та ресурсам ці групи можуть визначати дослідницькі потреби, проводити дослідження та пропонувати інноваційні рішення.

Мережа та співпраця: Беручи участь у цих групах, люди можуть розширити свої професійні зв'язки, взаємодіяти з експертами з різних галузей і професій, а також створити можливості для майбутньої співпраці та партнерства.

Найактивнішими робочими групами цього року були WG6, WG8, WG9 і WG10.

Розробка глобальної стратегії для EFNDT передбачає розширення її охоплення, впливу та співпраці за межі Європи для сприяння глобальному впливу в галузі НК.

На найближчі роки визначено ряд стратегічних цілей для EFNDT, а саме:

Покращення стандартів і настанов:

- співпрацювати з міжнародними організаціями та зацікавленими сторонами для розробки та оновлення стандартів і рекомендацій НК;
- сприяти прийняттю та впровадженню оновлених стандартів у всіх галузях.

Дослідження та розвиток:

- сприяти науковому співробітництву з академічними установами, галузями промисловості та дослідницькими організаціями для стимулювання інновацій у НК;
- виділити ресурси для дослідницьких проєктів, спрямованих на вирішення ключових проблем і нових технологій в галузі НК.

Охоплення промисловості та співпраця:

- зміцнення відносини з галузями та організаціями, які покладаються на НК для забезпечення якості та цілісності вузлів;
- організація галузевих семінарів і конференцій для вирішення проблем НК.

Сприяння обізнаності та пропаганді НК:

- підвищення обізнаності громадськості про важливість НК для безпеки, контролю якості та екологічної стійкості;
- взаємодія з політиками, щоб відстоювати визнання та включення НК у відповідні правила та стандарти.

Мережа та співпраця:

- розширення мережі EFNDT, налагодження партнерських відносин та співпраці з іншими організаціями та асоціаціями НК.

Цифрова трансформація:

- використання цифрових технологій та дослідження можливості їх інтеграції в процеси НК;
- спілкування з членами EFNDT через Інтернет, з одночасним вивченням інших можливих способів спілкування та передачі знань;
- сприяння обміну знаннями про цифрові інструменти та передовим досвідом за допомогою вебінарів, семінарів і публікацій.

Web-сайт EFNDT є предметом постійного розвитку та перегляду з наміром створити цінний і привабливий ресурс не лише для членів і функціонерів EFNDT, але й для спільноти НК в цілому. David Gilbert (BINDT) адмініструє вміст, облікові записи користувачів і дозволи, а DGZfP адмініструє Web-сайт і керує його вмістом. Для продовження роботи над сайтом у EFNDT була створена спеціальна робоча група. Його необхідно часто оновлювати та пропонувати відповідний контент для відвідувачів: точну інформацію про EFNDT, новини, події та публікації. Було б також цікаво мати можливість включити статті та тематичні дослідження. Загалом будь-які зусилля, пов'язані з присутністю EFNDT в Інтернеті, мають бути зосереджені на створенні міцного бренду, який допоможе й надалі залишатися еталоном для всіх національних і міжнародних товариств.



ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (відділ №4) виконує роботи з моніторингу технічного стану об'єктів (металоконструкцій, трубопроводів, бронезилетів, резервуарів для зберігання палива, прокату та заготовок для виготовлення деталей військової техніки) із застосуванням ультразвукового, магнітопорошкового, рентген-телевізійного, капілярного методів контролю та надає послуги з ремонту зварних з'єднань, дефектоскопічної та зварної техніки різного призначення.

E-mail: ndt@paton.kiev.ua, usndt@ukr.net

КАЛЕНДАР КОНФЕРЕНЦІЙ І ВИСТАВОК З НКТД

20–21 серпня 2024	Малазія, Куала-Лумпур	7 th Malaysia International NDT Conference and Exhibition (7 th MINDTCE) (7-а Малазійська міжнародна конференція і виставка)	The Malaysian Society for NDT
15–18 жовтня 2024	Китай, Пекін	The 3 rd World Congress on Condition Monitoring - WCCM 2023 (3-й Всесвітній конгрес з моніторингу технічного стану)	Chinese Society for NDT and China SEI Institute
15–17 жовтня 2024	Бєляни Вроцлавські, Польща	50 th National Conference on NDT (50-а Національна конференція з неруйнівного контролю)	Polish Society for NDT&TD
21–24 жовтня 2024	США, Лас Вегас	ASNT 2024 – The Annual Conference (Щорічна конференція Американського товариства з НК)	American Society for NDT
12–14 листопада 2024	Чехія, Бєроун	Defectoscopy 2024 (Щорічна конференція Чеського товариства з НК)	Czech Society for NDT
12–14 грудня 2024	Індія, Ченнай	NDE 2024 – 34 th Annual Conference & Exhibition on NDE (Щорічна конференція і виставка з неруйнівної оцінки)	Indian Society for NDT
03–06 березня 2025	Бангалор, Індія	3 rd International Conference on NDE 4.0 (3-я Міжнародна конференція з NDE 4.0)	Indian Society for NDT
9–12 червня 2025	Канада, Онтаріо	Pan-American Conference for Nondestructive Testing (VIII PANNDT) (Панамериканська конференція з неруйнівного контролю)	Canadian Institute for NDE
06–09 жовтня 2025	США, Орlando	ASNT 2025 – The Annual Conference (Щорічна конференція Американського товариства з НК)	American Society for NDT
11–14 травня 2026	США, Гаваї	17 th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing (APCNDT 2026) (17-а Азійсько-Тихоокеанська конференція з неруйнівного контролю)	American Society for NDT
15–19 червня 2026	Італія, Верона	The 14 th European Conference on Non-Destructive Testing (14 th ECNDT) (14-а Європейська конференція з НК)	Italian Society for NDT



ЧАС ЦИФРОВОЇ РЕНТГЕНТЕЛЕВІЗІЙНОЇ РАДІОГРАФІЇ (БЕЗ Р-ПЛІВКИ). РТК – ЦЕ ПРОСТО, ЯКІСНО, ШВИДКО, ДЕШЕВО!

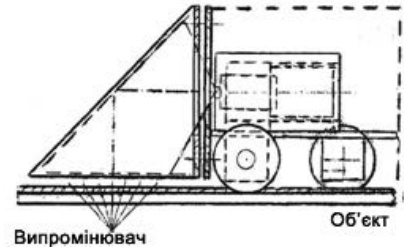
Технологія РТК



Надійно

Цифрову діагностику можна проводити за будь-яких погодних умов! Холод, спека, сніг або дощ – наші прилади працюють завжди! Не потрібні витратні матеріали, проявочні пристрої

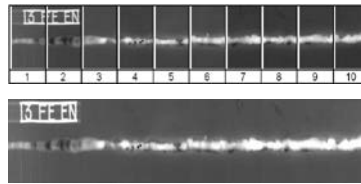
Рухомий РТК-перетворювач на магнітних колесах



ШВИДШЕ

Скорочено у рази час контролю порівняно з плівковою радіографією. Ефективно перевіряти рухомі об'єкти, можна поєднувати з плівковою радіографією

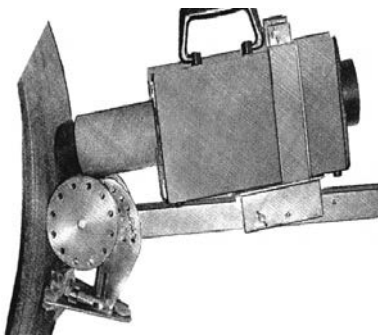
По'єднання окремих цифрових РТК-зображень в одну радіограму об'єкта практично будь-якої форми



ДЕШЕВШЕ

Вартість рентгентелевізійної радіографії набагато нижча за вартість контролю з використанням плівкової радіографії або інших променевих носіїв інформації

Р-апарат на магнітних колесах, що переміщується по поверхні об'єкта по точках виконання експозицій

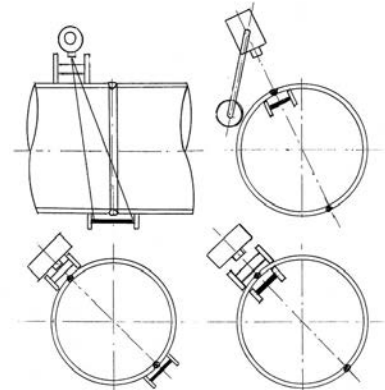


Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, відділ №4

Україна, 03038, м. Київ-38, а/с 20
тел.: (044) 205-22-15, 200-80-57,
(050) 334-33-22
e-mail: ndt@paton.kiev.ua
web: paton.org.ua

Рухомий РТК кільцевих та поздовжніх швів трубопроводів



В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблені технології миттєвого цифрового рентгентелевізійного контролю на основі флюороскопічних і твердотільних детекторів – способу отримання цифрового зображення дефектів в електронному вигляді, що не вимагає оброблювального, зчитувального обладнання, витратних матеріалів, спеціальних приміщень, які потрібні для плівкової радіографії.

В ІЕЗ налагоджено виготовлення перетворювачів РТК різного призначення (див. Патенти України №№ 111914, 113257, 120338, 145831, 143780).

ІЕЗ забезпечує повний сервіс РТК.





Центр сертифікації при Українському товаристві
неруйнівного контролю та технічної діагностики
Атестаційний центр неруйнівного контролю
при Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона

ЗАПРОШУЮТЬ СПЕЦІАЛІСТІВ

що працюють в сфері неруйнівного контролю
пройти підготовку, атестацію та сертифікацію
з різних методів неруйнівного контролю:

рентгенографічного (RT)	магнітного (MT)
ультразвукового (UT)	капілярного (PT)
акустико-емісійного (AT)	контролю герметичності (LT)
теплого (TT)	візуального (VT)
вібродіагностичного (VA)	вихрострумове (ET)

Ми здійснюємо підготовку, атестацію та сертифікацію спеціалістів, що працюють в галузі неруйнівного контролю, на 1, 2 і 3 рівні кваліфікації у відповідності до вимог національних та міжнародних стандартів:

- ДСТУ EN ISO 9712 «Неруйнівний контроль. Кваліфікація та сертифікація персоналу НК»,
- SNT-TC-1A "Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing",
- НПАОП 0.00-1.63-13 "Правила сертифікації фахівців з неруйнівного контролю"

в 12 виробничих секторах:

сектори за типом продукції: литво, поковки, зварні вироби, труби та трубопроводи, прокат.

промислові сектори: виробництво та оброблення металів, контроль перед введенням та в процесі експлуатації, залізничний транспорт та обладнання для нього, авіакосмічна продукція, продукція суднобудування, обладнання для атомної енергетики, бурове обладнання.

**Ви отримаєте сертифікат компетентності фахівця від Центру сертифікації
Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики**

Три кроки до сертифікату:

1. На сайті www.usndt.com.ua в розділі «Сертифікація→Форми» знайдіть, заповніть і надішліть на e-mail: usndt@ukr.net і acnk@ukr.net форми «Заявка на сертифікацію» та «Особова карта фахівця»;
2. Ми підготуємо проект договору про надання послуг з підготовки (за необхідності), атестації і сертифікації;
3. Після підписання договору з боку Замовника ми погодимо з Вами терміни підготовки, екзаменів, а також інші питання стосовно сертифікації.

м. Київ, вул. Казимира Малевича, 23 (корпус 6 ІЕЗ ім. Є.О. Патона)
м. Київ-38, 03038, а.с. 20 (для листування)
тел. (044) 205-22-49, 200-81-40; e-mail: usndt@ukr.net, acnk@ukr.net