

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);

В.П. Бабак (заст. гол. ред.)

Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ

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

Харківський нац. ун-т Повітряних Сил імені Івана

Кожедуба, 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;

П.М. Райтер

ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ;

А. Савін

Національний інститут досліджень та розробок з

технічної фізики, Ясси, Румунія;

В.О. Стороженко

ХНУ радіоелектроніки, м. Харків;

Г.М. Сучков

НУ «ХПІ», 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 3041-2366 online, ISSN 3041-2358 print

Doi.org/10.37434/tdnk

Журнал зареєстровано Національною радою України з

питань телебачення і радіомовлення 09.05.2024,

ідентифікатор медіа R30-04568.

Передплата 2025

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

Лобанов Л.М., Шкурат І.Л., Стельмах Д.І., Шуткевич О.П., Савицький В.В. Підвищення ефективності діагностики великогабаритних конструкцій на основі використання БПЛА та нейронних мереж 3

Учанін В.М., Алещенко О.Г., Савін А., Дереча В.Я. Дослідження вихрострумового резонансного методу вимірювання товщини шару підсиленого вуглецевим волокном пластику на металевих конструкціях 12

Стороженко В.О., Мягкий О.В., Мешков С.М., Орел Р.П. Використання вейвлет-аналізу та диференціально-інтегральних графічних методів для обробки термограм у тепловому неруйнівному контролі 18

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

Герєб Я., Яременко М.А., Овсієнко М.А., Недосєка С.А., Топчев Д.Д., Кушніренко С.О. Система автоматичного тестування функціональних і вимірювальних параметрів апаратури акустичної емісії 23

Стешенко Я.В., Протасов А.Г. Автоматизована система керування технологічним процесом укладання асфальто-бетонного покриття 30

Морозова М.М. Застосування послідовного вибіркового контролю при оцінюванні якості вимірювальних пристроїв і датчиків 36

ІНФОРМАЦІЯ

Пам'яті Петра Трампуса 42

Конференція-виставка «Неруйнівний контроль в залізничній галузі – 2025» 43

Семінар «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану» 46

Новини Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики 49

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 the NAS of Ukraine, 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);
V.P. Babak (Deputy Editor-in-Chief)
General Energy Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv
Krzysztof Dragan,
Air Force Institute of Technology, Warsaw, Poland;
Janez Grum,
University of Ljubljana, Slovenia;
M.L. Kazakevich,
L.V. Piszarzhetskii Institute of Physical Chemistry of the NAS of Ukraine, Kyiv;
O.M. Karpash
Ivan Kozhedub National University of the Air Force, Ivano-Frankivsk, 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 the NAS of Ukraine, Lviv;
V.S. Eremenko, Yu.V. Kuts, A.G. Protasov
NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine;
P.M. Raiter
Ivano-Frankivsk NTU of Oil and Gas, 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. Chaurov
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 3041-2366 online, ISSN 3041-2358 print
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 2025

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

- Lobanov L.M., Shkurat I.L., Stelmakh D.I., Shutkevych O.P., Savitsky V.V.* Enhancing the efficiency of large-scale structure diagnostics through the use of uav and neural networks 3
- Uchanin V.N., Aleschenko O.G., Savin A., Derecha V.Ja.* Research of the eddy-current resonance method for measuring the thickness of the carbon fiber reinforced plastic layer on metallic structures 12
- Storozhenko V.O., Miahkyi O.V., Meshkov S.M., Orel R.P.* Application of wavelet analysis and differential-integral graphical methods for thermograms processing in thermal nondestructive testing 18

INDUSTRIAL

- Gereb Y., Yaremenko M.A., Ovsienko M.A., Nedoseka S.A., Topchev D.D., Kushnyrenko S.O.* System for automatic testing of functional and measurement parameters of acoustic emission equipment 23
- Steshenko Y.V., Protasov A.G.* Automated control system for the technological process of asphalt concrete coating laying 30
- Morozova M.M.* Application of sequential sampling inspection for quality control of measuring devices and sensors 36

INFORMATION

- In memory of Peter Trampus 42
- Conference-exhibition «Non-destructive testing in the railway industry – 2025» 43
- Seminar «Non-destructive testing and monitoring of technical condition» 46
- News of the Ukrainian society for non-destructive testing 49

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»

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІАГНОСТИКИ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ БПЛА ТА НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Л.М. Лобанов, І.Л. Шкурат, Д.І. Стельмах, О.П. Шуткевич, В.В. Савицький

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: innashkurat2909@gmail.com

У статті представлено підхід до дистанційної діагностики пошкоджень великогабаритних інженерних конструкцій із використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) і згорткових нейронних мереж. Дослідження було проведено з метою автоматизації процесу виявлення структурних дефектів конструкції Київської телевежі. Методологія дослідження передбачала збір і попередню обробку 14187 зображень та розробку модифікованої архітектури нейронної мережі U-Net для сегментації пошкоджень. Експериментальне дослідження різних архітектурних налаштувань моделі продемонструвало ефективність запропонованих модифікацій, які дозволили знизити похибку виявлення дефектів на 3...5 % порівняно з базовими моделями. Встановлено, що оптимальна кількість ітерацій навчання становить 15–20 епох. Розроблена модель продемонструвала здатність виявляти пошкодження, які можуть бути пропущені оператором, що підтверджує потенціал автоматизованих систем діагностики на основі штучного інтелекту. Дослідження надає нові перспективи для підвищення ефективності моніторингу інфраструктурних об'єктів, особливо в умовах обмеженого доступу або підвищених ризиків для персоналу. Бібліогр. 41, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: дистанційна діагностика, дефекти, штучний інтелект, нейронні мережі, сегментація зображень, БПЛА

Вступ. Систематичний моніторинг технічного стану великогабаритних об'єктів є важливим для оцінки їх структурної цілісності. З часом конструкції зазнають змін, спричинених корозією, старінням матеріалів, впливом навантажень і зовнішніх факторів.

Для безпечної та безперервної експлуатації великогабаритних об'єктів необхідно здійснювати періодичний моніторинг і своєчасно виявляти дефектні ділянки, визначати необхідні профілактичні заходи та планувати першочергові ремонтні роботи. Це особливо актуально у військовий та післявоєнний періоди, коли інфраструктурні об'єкти зазнають значних ушкоджень.

Методи неруйнівного контролю (NDT) широко використовуються як інструмент діагностики інженерних споруд для оцінки їх технічного стану [1–4]. Традиційні методи неруйнівного контролю якості, зокрема ультразвуковий контроль [5, 6], магнітно-порошковий метод [7], акустична емісія [8, 9], інфрачервона термографія [10, 11] та ін., хоча й демонструють значний прогрес, проте мають ряд обмежень. Зокрема, їхня точність залежить від зовнішніх факторів (вологості, температури, рівня шуму), а інтерпретація результатів може ускладнюватися через суб'єктивний фактор оператора. Окрім того, такі методи є трудомісткими, потребують високих фінансових витрат і пе-

редбачають безпосередню участь персоналу, що підвищує рівень ризиків, особливо при обстеженні великогабаритних і важкодоступних конструкцій.

Одним із найефективніших способів візуального обстеження інженерних конструкцій є використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Завдяки швидкому розвитку технологій БПЛА інтегрувалися в систему дистанційного моніторингу інфраструктурних об'єктів, демонструючи високу ефективність у важкодоступних місцях, де застосування традиційних методів є обмеженим [12–17]. Порівняно з традиційними методами, дослідження з використанням БПЛА виконуються значно швидше та забезпечують високу просторову роздільну здатність зображень. Це дозволяє отримувати деталізовані дані з високою точністю, що є важливим для аналізу стану об'єктів і прийняття обґрунтованих рішень [18]. Їх використання не лише покращує точність і швидкість моніторингу, але й суттєво знижує витрати людських і часових ресурсів, одночасно мінімізуючи ризики для обслуговуючого персоналу [19–22].

У зв'язку з поширенням і вдосконаленням штучного інтелекту (ШІ) та нейронних мереж (НМ) процес виявлення дефектів великогабаритних конструкцій поступово розвивається в напрямку автоматизації та інтелектуалізації. Ця методика базується на високій ефективності ней-

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Шкурат І.Л. – <https://orcid.org/0009-0003-1888-4203>,
Стельмах Д.І. – <https://orcid.org/0000-0002-0412-9747>, Шуткевич О.П. – <https://orcid.org/0000-0001-5758-2396>,
Савицький В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2615-1793>

© Л.М. Лобанов, І.Л. Шкурат, Д.І. Стельмах, О.П. Шуткевич, В.В. Савицький, 2025

ронних мереж при виявленні та обробці ознак, сприяючи вдосконаленню якості та точності процесу визначення дефектних ділянок.

Застосування ШІ та НМ у сфері аналізу даних визначається їх здатністю до автоматичного навчання та адаптації до різноманітних вхідних умов, що робить ці технології перспективними в контексті підвищення надійності та швидкості процесів локалізації дефектів на елементах великогабаритних конструкцій.

Існують підходи до розпізнавання дефектів, що базуються на використанні різних архітектур НМ, методів навчання та вибору гіперпараметрів. Гіперпараметри НМ задаються вручну або автоматично перед початком процесу навчання: кількість шарів у НМ, тип активаційної функції, оптимізатор та ін. Вибір гіперпараметрів суттєво впливає на точність моделі, швидкість навчання та якість отриманих результатів. Зокрема, глибокі згорткові НМ (Convolutional Neural Networks (CNN)) досить ефективно застосовуються для вирішення задач класифікації, сегментації, розпізнавання та виявлення дефектів на зображеннях.

Із розвитком обчислювальних потужностей та зростанням обсягів баз даних зображень [23] архітектури CNN продовжують вдосконалюватися [24]. У порівнянні зі стандартними НМ прямого поширення, згорткові НМ мають значно менше зав'язків і параметрів, що робить їх менш ресурсомісними у навчанні. CNN використовують припущення про локальність піксельних взаємодій, що дозволяє ефективно виділяти ключові структурні елементи зображення, зменшуючи кількість параметрів, які необхідно оптимізувати [25].

Згорткові НМ є особливо ефективними для задач обробки зображень, оскільки вони автоматично ідентифікують різноманітні ознаки зображень на різних рівнях їхнього подання. Завдяки застосуванню операції згортки CNN здатні виявляти структурні особливості у вхідних даних, що забезпечує високу точність у задачах класифікації [26], сегментації [27, 28] та розпізнавання об'єктів [29, 30].

Протягом останніх років наукова спільнота досягла значного прогресу в застосуванні методів машинного навчання в різних сферах. Зокрема, НМ активно використовуються для виявлення дефектних ділянок на основі зображень, у тому числі виявлення тріщин у бетоні [31], процесів відшарування та розшарування поверхонь [32], втомних тріщин [33], корозії сталевих конструкцій [34]. Запроваджені методи обробки зображень дозволяють частково замінити традиційний моніторинг, що здійснюється операторами на місцях, забез-

печуючи ефективніше й точніше виявлення ознак дефектів на бетонних і металевих поверхнях [35–38]. Значний інтерес становлять дослідження, що демонструють ефективність застосування БПЛА у поєднанні з методами глибокого навчання для точної ідентифікації дефектних ділянок [39, 40].

Таким чином, впровадження ШІ в дистанційну діагностику великогабаритних конструкцій є актуальним напрямком розвитку автоматизованої діагностики, спрямованим на підвищення ефективності моніторингу, оптимізацію ресурсів і покращення точності, швидкості й надійності виявлення дефектних ділянок.

Методологія. Збір і підготовка даних до навчання нейронної мережі. Як об'єкт дослідження була обрана Київська телевежа, яка зазнала структурних пошкоджень внаслідок ракетного удару. Для проведення дистанційної діагностики нижнього ярусу Київської телевежі використовувався БПЛА з роздільною здатністю камери 5280×3956 пікселів. Планування траєкторії обльоту є важливим етапом, що безпосередньо впливає на ефективність реалізації завдань дистанційного моніторингу та збору даних.

Методологія обльоту передбачала наступні етапи:

- визначення траєкторії польоту, що забезпечує оптимальний огляд об'єкта з урахуванням вимог до точності просторового позиціонування;
- урахування впливу зовнішніх факторів, таких як: погодні умови (вітер, кут падіння сонячних променів, опади), правила безпеки (висотні обмеження, зони обмеженого польоту), вимоги до точності (роздільна здатність, покриття).

Дистанційний моніторинг нижнього ярусу Київської телевежі складався з відеосканування зовнішньої поверхні знизу–вгору, корекції траєкторії бічним рухом, а також подальшого сканування у зворотному напрямку (зверху–вниз). З огляду на геометричні параметри та конфігурацію ліфтової шахти, виконання обльоту здійснювалося за круговою траєкторією. Замкнута траєкторія польоту навколо шахти мінімізує ризики втрати просторового покриття.

Для мінімізації впливу нерівномірного освітлення моніторинг проводився за стабільних погодних умов із рівномірним розподілом природного світла. Це дозволило уникнути різких контрастів і покращити якість зображень для подальшої аналітики.

Було проведено аналіз можливих ризиків, що передбачали:

- альтернативні маршрути польоту;

- резервні точки зльоту та посадки;
- алгоритми аварійного повернення БПЛА у разі втрати зв'язку.

Збір даних здійснювався при мінімально можливій відстані до об'єкта в режимі «повільного польоту», що сприяло підвищенню просторової роздільної здатності та якості отриманих зображень. Оптимізація кута огляду досягалася шляхом динамічного регулювання нахилу камери для мінімізації затінення та забезпечення повного охоплення структурних елементів. Висота польоту варіювалася залежно від розмірів конструктивних елементів нижнього ярусу телевежі для отримання високодеталізованих зображень із різних ракурсів.

Після збору даних проводилась обробка зображень, яка передбачала такі етапи:

- кадрування, у результаті якого було згенеровано набір зображень із роздільною здатністю 5472×3078 пікселів;
- адаптацію розмірів для подальшої обробки нейронною мережею, а саме, кожне зображення було розділене на менші фрагменти розміром 128×128 пікселів із перекриттям 50 % за шириною та висотою. Такий підхід забезпечив рівномірне покриття зображень і створення різноманітного навчального набору. У результаті було отримано 14187 сегментів, підготовлених для тренування НМ;
- анування дефектних ділянок, яке здійснювалося у програмному середовищі Labelme із використанням полігональних міток, що дозволяло точно позначати контури об'єктів шляхом апроксимації полігонами;
- нормалізацію яскравості та контрастності у програмному середовищі Labelme, що дозволяло виявити низькоконтрастні пошкодження, які не були чітко видимими на вихідних зображеннях;

- класифікацію пошкоджень на зображеннях за двома типами: корозію та значні структурні дефекти (отвори, тріщини);

– створення масок, які використовувалися для сегментації пошкоджень і виділення ключових областей аналізу.

Архітектура нейронної мережі. Виявлення дефектів конструкції на зображеннях – це задача сегментації, яка передбачає класифікацію кожного пікселя вхідного зображення. Для вирішення подібних завдань застосовуються згорткові нейронні мережі (CNN), зокрема архітектура U-Net та її модифікації. Відмінності між варіаціями U-Net: кількість шарів і фільтрів, використання нормалізації, тип функції активації, функція втрат тощо [41].

З метою підвищення ефективності сегментації було проведено серію експериментів з різними конфігураціями архітектури U-Net (рис. 1). Варіювалися такі параметри, як: початкова кількість фільтрів згорткових шарів, кількість рівнів згорткових операцій та функцій активації.

Для покращення продуктивності НМ на основі архітектури U-Net використовувалися такі вдосконалення:

- додавання механізму зчеплення (concatenation) відповідних шарів енкодера та декодера для збереження просторової інформації;
- подвоєння кількості згорткових шарів для покращення здатності моделі до вилучення ознак;
- нормалізація вхідних даних для підвищення стабільності процесу навчання.

Навчання нейронної мережі. Моделі НМ були реалізовані мовою Python 3.10.12 із використанням бібліотек TensorFlow та Keras, версія 2.9.0. При навчанні НМ її параметри зберігалися після кожної епохи навчання.

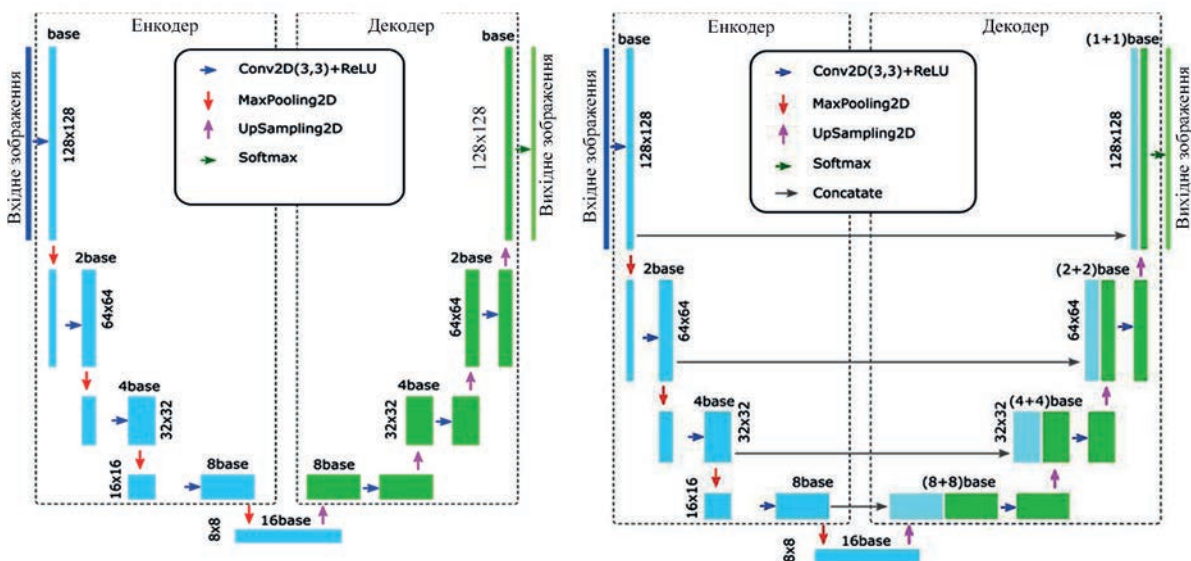


Рис. 1. Архітектура U-Net моделі: а – базова модель; б – з додатковим зчепленням шарів

Створений набір даних був розділений на тренувальний, валідаційний і тестовий набори, у співвідношенні 80 до 20 %. Тренувальний набір даних (зображення з відповідними мітками) використовувався для навчання моделі, при цьому враховувались параметри навчання, такі як: кількість епох, розмір пакету, швидкість навчання та функція втрат. Додатково використовувалися оптимізатори для адаптації ваг моделі з метою мінімізації функції втрат під час тренування та для забезпечення ефективного навчання та конвергенції моделі.

Для підвищення узагальнюючої здатності моделі, тобто її здатності коректно працювати на нових, раніше не бачених даних, застосовувалася аугментація даних. Це – штучне збільшення різноманітності навчального набору, яке покращує стійкість моделі. Для зображень аугментація передбачала такі методи, як: обертання, зміна кольору тощо.

Оптимізація параметрів здійснювалася за допомогою алгоритму Adam з функцією втрат Sparse Categorical Crossentropy, де Adam є алгоритмом, який допомагає неймережі швидше й точніше знаходити оптимальні ваги під час навчання. Sparse Categorical Crossentropy – спосіб вимірювання помилки НМ при класифікації, коли кожне зображення або об'єкт належить до одного з кількох класів.

Було також протестовано вплив різних функцій активації в останньому шарі мережі, зокрема лінійної та Softmax, що дозволило оцінити їхню ефективність при розпізнаванні класів дефектів (табл. 1).

Softmax function – це функція активації, яка часто використовується в машинному навчанні, особливо в задачах класифікації з кількома класами [41]. Вона перетворює вектор довільних чисел (вихідні значення нейронної мережі) у вектор ймовірностей, де кожне значення відповідає ймовірності належності до певного класу. Для вектора $z = [z_1, z_2, \dots, z_n]$, де z_i – вихід нейронної мережі

для i -го класу, функція Softmax обчислюється за формулою:

$$\text{Softmax}(z_i) = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^n e^{z_j}}$$

де e^{z_i} – експонента i -го елемента вектора z ; $\sum_{j=1}^n e^{z_j}$ – сума експонент усіх елементів вектора z .

Softmax – це вектор ймовірностей, де кожне значення знаходиться в діапазоні від нуля до одиниці, а сума всіх значень дорівнює 1.

Табл. 1 містить результати навчання НМ, де досліджується вплив початкової кількості фільтрів згорткового шару та функції активації вихідного шару на точність моделі. Оцінка проводиться на основі показників функції втрат для навчального (loss) та тестового (val_loss) наборів даних, кількості епох, необхідних для навчання, а також загальної кількості параметрів моделі.

Порівняння двох варіантів вихідного шару (лінійна активація та Softmax) показує, що використання Softmax забезпечує нижчу тестову похибку (val_loss) в усіх конфігураціях. Це свідчить про кращу здатність моделі до узагальнення, особливо при меншій кількості фільтрів.

Збільшення кількості фільтрів (від 4 до 16) призводить до зростання кількості параметрів моделі, що може покращувати її здатність до навчання, але також підвищує ризик перенавчання, коли модель демонструє високу точність на навчальних даних, втрачаючи здатність до узагальнення на нових, раніше не бачених тестових або реальних даних, особливо при використанні великої кількості фільтрів (base = 16). Це підтверджується зростанням похибки на тестовому наборі (val_loss) після 15–20 епох навчання, що свідчить про можливий перехід від узагальнюючої здатності до перенавчання.

На рис. 2 наведено залежність функції втрат (loss) для навчального та тестового наборів даних від кількості епох під час тренування НМ при використанні моделі з лінійною функцією активації та базовою кількістю фільтрів 4 (base = 4).

Таблиця 1. Вплив функцій активації на моделі U-Net з різною кількістю фільтрів і параметрів, що розраховуються під час навчання

Початкова кількість фільтрів (base)	Похибка на навчальному датасеті (loss)	Похибка на тестовому датасеті (val_loss)	Кількість епох	Кількість параметрів моделі
Лінійна функція активації останнього шару				
4	0,0907	0,1131	20/50	49267
8	0,0520	0,0874	33/50	196451
16	0,0761	0,0894	15/50	784579
Активация останнього шару Softmax				
4	0,0561	0,0758	43/50	49267
8	0,0486	0,0824	30/50	196451
16	0,0626	0,1012	16/50	784579

На початкових етапах навчання (0–10 епох) спостерігається стрімке зменшення обох похибок (loss та val_loss), що свідчить про ефективне навчання моделі. Однак після 20-ї епохи похибка на навчальному наборі даних (train_loss) продовжує зменшуватися, тоді як похибка на тестовому наборі даних (val_loss) починає зростати. Це є ознакою перенавчання, коли модель втрачає здатність до узагальнення на нових даних. Таким чином, оптимальна кількість ітерацій навчання складає 20 епох, що запобігає надмірному запам'ятовуванню навчальних зразків.

Однією з основних характеристик, які визначають ефективність НМ, є похибка сегментації (val_loss) на зображеннях, що не використовувались для навчання CNN моделі. У результаті проведених досліджень встановлено, що похибка виявлення дефектів становить від 7 до 11 % (табл. 1).

Оптимальною конфігурацією моделі для узагальнення результатів є використання восьми фільтрів разом із функцією активації Softmax. Така конфігурація забезпечує найнижче значення тестової похибки (0,0824).

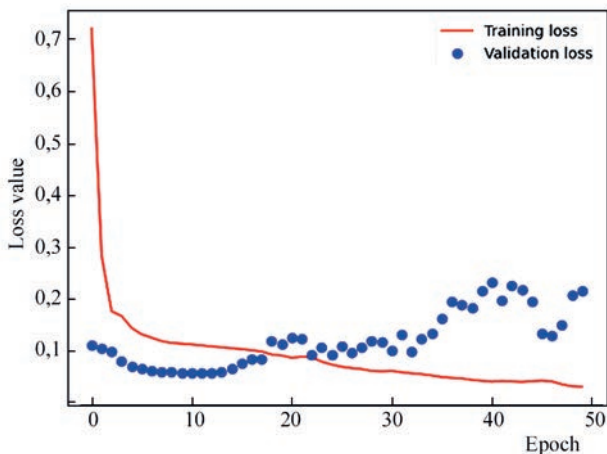


Рис. 2. Залежність функції втрат (loss) для навчального та валідаційного наборів даних від кількості епох під час тренування нейронної мережі

Результати тестування різних модифікацій архітектури U-Net з варіацією початкової кількості фільтрів, кількості згорткових шарів, використанням нормалізації та збільшенням кількості блоків наведено в табл. 2.

Було досліджено три варіанти архітектури моделей U-Net:

- базову модель з додатковим зчепленням блоків;
- базову модель з подвоєною кількістю згорткових шарів зі зчепленням блоків;
- базову модель з подвоєною кількістю згорткових шарів, зчепленням блоків і нормалізацією.

Кожна з цих архітектур тестувалася з різною початковою кількістю фільтрів (base = 4, 8, 16), що загалом сформувало 9 різних конфігурацій моделей.

Базова модель зі збільшеною кількістю блоків демонструє покращені результати порівняно з початковою архітектурою, проте її точність обмежена, особливо при малій кількості фільтрів. Додавання додаткових згорткових шарів дозволяє знизити похибку на навчальному наборі, але без нормалізації спостерігається нестабільність на тестових даних, що особливо помітно при початковій кількості фільтрів, base = 4 (val_loss = 0,1342). Використання нормалізації у поєднанні зі збільшенням кількості блоків і згорткових шарів дозволяє досягти мінімального значення похибки на тестовому наборі val_loss = 0,0518 при base = 4, що свідчить про ефективність такого підходу для менш складних архітектур. Таким чином, оптимальним варіантом є архітектура з подвоєною кількістю згорткових шарів, збільшенням блоків і нормалізацією, що дозволяє мінімізувати похибку при контрольованій складності моделі.

На рис. 3 наведено залежності функції втрат (loss) для навчального та тестового наборів даних від кількості епох під час тренування базової моделі з додатковим зчепленням блоків, а також вдо-

Таблиця 2. Результати тестування вдосконалених моделей U-Net

Початкова кількість фільтрів (base)	Похибка на навчальному датасеті (loss)	Похибка на тестовому датасеті (val_loss)	Кількість епох	Кількість параметрів моделі
Базова модель + зчеплення блоків				
4	0,0683	0,0703	36/50	61507
8	0,0601	0,0599	18/50	245411
16	0,0314	0,0656	36/50	980419
Базова модель з подвоєною кількістю згорткових шарів + зчеплення блоків				
4	0,1335	0,1342	26/50	86107
8	0,0483	0,0841	21/50	343571
16	0,0658	0,0527	10/50	1372579
Базова модель з подвоєною кількістю згорткових шарів + зчеплення блоків + нормалізація				
4	0,0403	0,0518	48/50	86587
8	0,0292	0,0575	15/50	344531
16	0,0308	0,0598	14/50	1374499

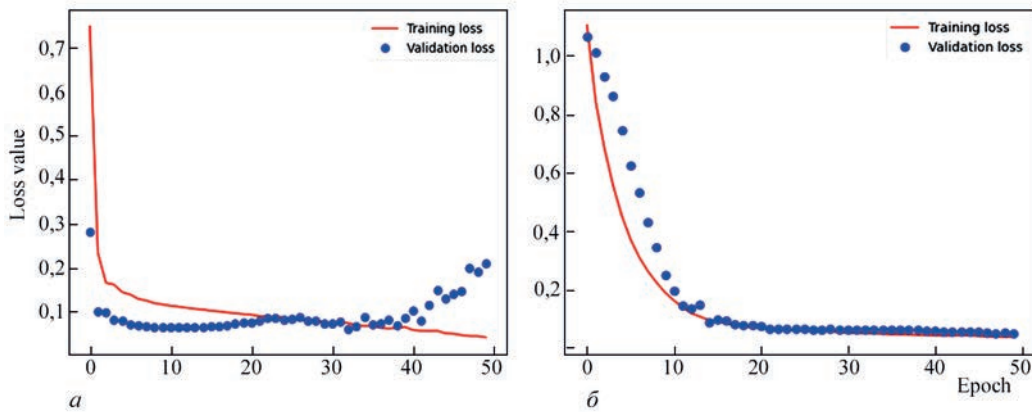


Рис. 3. Залежність функції втрат (loss) для навчального та тестового наборів даних зображень: *a* – базова модель з додатковим зчепленням блоків, *б* – вдосконалена модель U-Net з подвоєною кількістю згорткових шарів, зчепленням блоків і нормалізацією шарів

сконаленої моделі U-Net з подвоєною кількістю згорткових шарів, зчепленням блоків і нормалізацією шарів.

Базова модель з додатковим зчепленням блоків (рис. 3, *a*) демонструє швидке навчання, однак схильна до перенавчання, що підтверджується зростанням похибки на тестовому наборі даних (val_loss) після 20-ти епох.

При порівнянні з рис. 2 можна бачити суттєве зниження різниці значень похибки під час навчання до 3...5 %, що свідчить про точніший розрахунок параметрів моделі порівняно з використанням базової архітектури U-Net (рис. 3, *a*).

На початкових етапах навчання (0–10 епох) вдосконаленої моделі U-Net (рис. 3, *б*) значення функції втрат для тренувального (loss) і тестового (val_loss) наборів швидко зменшуються. Близькі значення цих похибок на старті пояснюються тим, що модель ще не сформувала складні закономірності й узагальнення, тому її продуктивність на тренувальних і тестових даних є подібною. У процесі подальшого навчання модель адаптується до особливостей тренувальних даних. Після 15–20 епох тренувальна та тестова похибки стабілізуються без значного розходження, що свідчить про гарне узагальнення та відсутність перенавчання.

Це свідчить про те, що модель досягла оптимальної продуктивності та може ефективно узагальнюватися на нових даних. Таким чином, запропоновані модифікації архітектури U-Net дозволили підвищити точність моделі при виявленні дефектів на зображеннях конструкцій.

Аналіз отриманих результатів. На рис. 4 наведено результати автоматичного визначення пошкоджених ділянок на зображеннях за допомогою базової моделі з кількістю фільтрів $base = 4$. Візуальне порівняння областей, позначених оператором (рис. 4, *б*), та сегментованих областей, отриманих нейронною мережею (рис. 4, *в*), демонструє, що модель здатна виявляти пошкодження, які залишилися непоміченими оператором. Однак результат сегментації, отриманий за допомогою нейронної мережі, має значну похибку, пропущені області, що вказує на недостатню точність.

На рис. 5 наведено результати застосування вдосконаленої моделі U-Net, кількість фільтрів $base = 16$ і з Softmax-активацією, які показують точнішу сегментацію дефектних ділянок, зменшуючи кількість помилкових класифікацій у порівнянні з базовою версією (рис. 4).

На рис. 6 наведено приклад, коли НМ успішно ідентифікувала дефектну область, спричинену

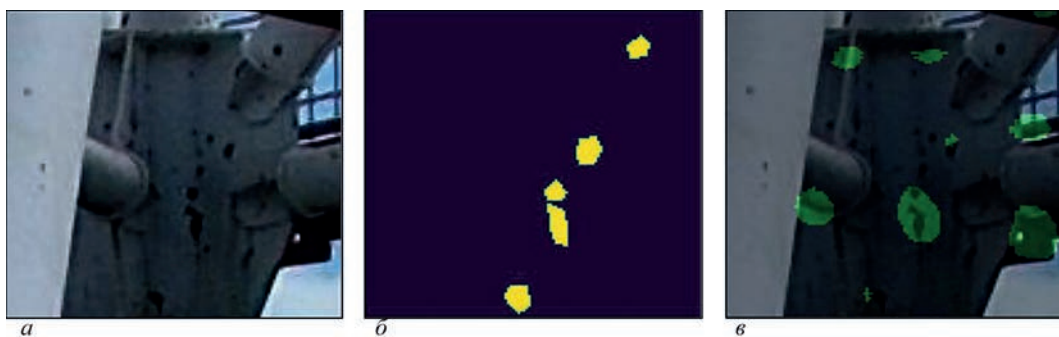


Рис. 4. Автоматичне визначення пошкоджених ділянок моделі з параметрами: $base = 4$, останній активаційним шар – лінійний: *a* – фрагмент зображення пошкодженого вузла, *б* – пошкоджені ділянки, які позначені оператором жовтим кольором, *в* – результат сегментації, отриманий нейронною мережею (зелений колір)

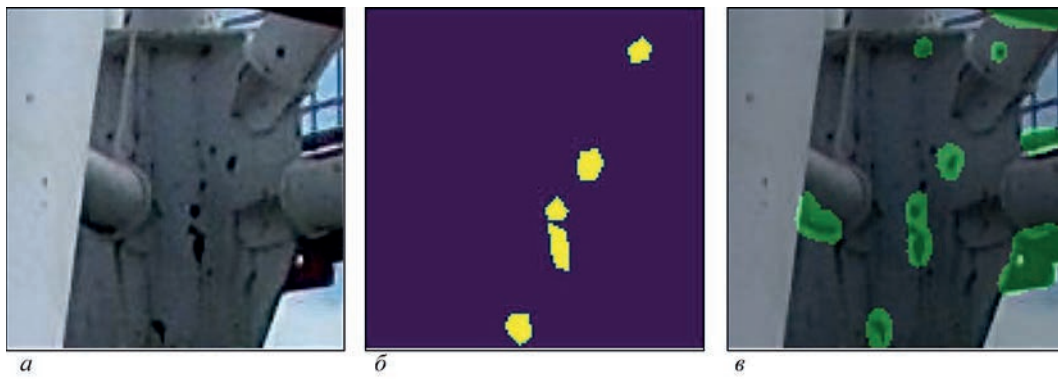


Рис. 5. Автоматичне визначення пошкоджених ділянок з використанням вдосконаленої моделі U-Net з параметрами: base = 16, останній активаційним шар – Softmax, *a* – фрагмент зображення пошкодженого вузла, *б* – пошкоджені ділянки, які позначені оператором жовтим кольором, *в* – результат сегментації, отриманий нейронною мережею (зелений колір)

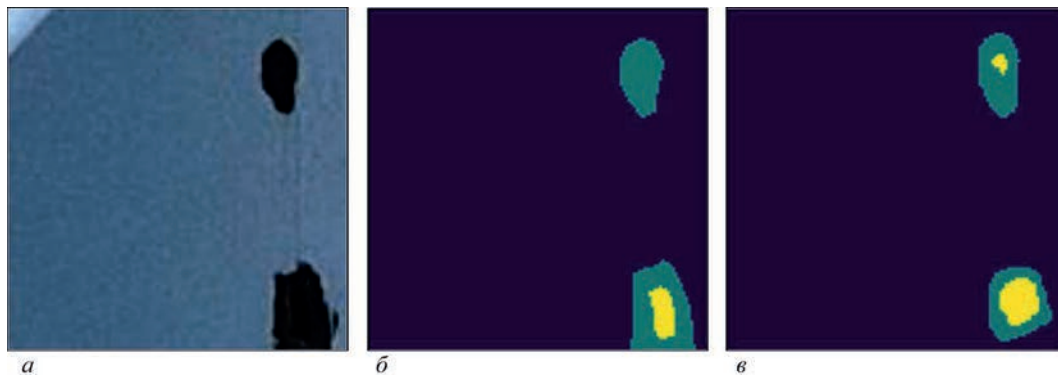


Рис. 6. Автоматичне визначення пошкоджених ділянок з використанням удосконаленої моделі U-Net з параметрами: base = 16, останній активаційним шар – Softmax, *a* – фрагмент зображення з пошкодженими ділянками, *б* – пошкоджені ділянки, які позначені оператором, *в* – результат сегментації, отриманий нейронною мережею. Зелений колір позначає корозійне пошкодження, жовтий – отвір. Модель, кількість фільтрів – 16 (base = 16) з останнім активаційним шаром Softmax

проникненням уламків крізь стінку трубчастого елементу телевежі, яка була пропущена оператором при створенні анотації. Порівняння масок (рис. 6, *б* і рис. 6, *в*) показує, що прогнозовані області пошкоджень добре збігаються з реальними даними. Це підтверджує ефективність моделі. Отримані результати підтверджують здатність моделі виявляти пошкодження, які можуть залишатися непоміченими, тим самим мінімізуючи вплив людського фактора при проведенні візуальної діагностики конструкцій.

Отримані результати демонструють ефективність нейронної мережі U-Net для автоматичного виявлення пошкоджень. Проте неповне або неточне маркування дефектних ділянок оператором у навчальному наборі даних може негативно впливати на якість моделі, оскільки її навчання залежить від відповідності міткам, які були позначені оператором. Отже, формування якісної бази даних з повним і точним маркуванням дефектів є важливим фактором для створення високоточної моделі НМ.

Висновки

Проведене дослідження підтвердило ефективність застосування нейронних мереж для автоматизованого виявлення дефектів, що сприяє підви-

щенню точності діагностики та мінімізації впливу суб’єктивного фактора.

Аналіз ефективності різних архітектур нейронних мереж показав, що моделі з більшою кількістю фільтрів забезпечують покращену здатність до ідентифікації дефектів, проте їх використання потребує значних обчислювальних ресурсів і часу на тренування. Модифіковані архітектури U-Net, зокрема шляхом додавання додаткових блоків і нормалізації, дозволили знизити похибку виявлення дефектів до 3...5 %, що є суттєвим покращенням порівняно з базовими моделями. Встановлено, що оптимальна кількість ітерацій для навчання моделей з модифікованою архітектурою становить 15–20, оскільки подальше навчання призводить до перенавчання та зростання похибки на тестових даних.

Використання модифікованих архітектур нейронних мереж із застосуванням механізмів нормалізації та адаптивного налаштування гіперпараметрів є перспективним напрямом для підвищення точності й надійності автоматизованої діагностики дефектів на основі аналізу зображень, що відкриває можливості для подальшої інтеграції таких систем у процес моніторингу.

Подяка

Опубліковані результати отримані в рамках реалізації проєкту 022.01/0095 «Розробка технології дистанційної діагностики пошкоджених великогабаритних об'єктів на основі застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та фотограмметрії», за грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди»

Список літератури/References

1. Balayssac, J.-P., Garnier, V. et al. (2018) *Non-Destructive testing and evaluation of civil engineering structures*. STE Press Ltd., Elsevier Science. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01227-5>
2. Reddy, K.A. (2017) Non-destructive testing, evaluation of stainless steel materials. *Mater. Today Proc.*, 4(8), 7302–7312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.060>
3. Deepak, J.R., Raja, V.K.B., Srikanth, D., Surendran, H., Nickolas, M.M. (2021) Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints: A review and experimental study. *Mater. Today Proc.*, 44(8), 3732–3737. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.578>
4. Polimeno, M., Roselli, I., Luprano, V.A.M., Mongelli, M., Tati, A., De Canio, G. (2018) A non-destructive testing methodology for damage assessment of reinforced concrete buildings after seismic events. *Engineering Structures*, 163, 122–136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.053>
5. Bahonar, M., Safizadeh, M. (2021) Investigation of real delamination detection in composite structure using air-coupled ultrasonic testing. *Composite Structures*, 280, 114939. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114939>
6. Chen, Y., Kang, Y., Feng, B., Li, Y., Cai, X. (2022) Automatic defect identification in magnetic particle testing using a digital model aided de-noising method. *Measurement*, 198, 111427. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111427>
7. Van Steen, C., Pahlavan, P., Wevers, M., Verstrynge, E. (2018) Localisation and characterisation of corrosion damage in reinforced concrete by means of acoustic emission and X-ray computed tomography. *Construction and Building Materials*, 197, 21–29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.159>
8. Suzuki, T., Ogata, H., Takada, R., Aoki, M., Ohtsu, M. (2010) Use of acoustic emission and X-ray computed tomography for damage evaluation of freeze-thawed concrete. *Construction and Building Materials*, 24, 2347–2352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.05.005>
9. Pedram, M., Taylor, S., Hamill, G., Robinson, D., O'Brien, E., Uddin, N. (2022) Experimental evaluation of heat transition mechanism in concrete with subsurface defects using infrared thermography. *Construction and Building Materials*, 360, 129531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129531>
10. Shrestha, P., Avci, O., Rifai, S., Abila, F., Seek, M., Barth, K., Halabe, U. (2025) A review of infrared thermography applications for civil infrastructure. *Structural Durability & Health Monitoring*, 19(2), 193–231. DOI: <https://doi.org/10.32604/sdhm.2024.049530>
11. Lobanov, L.M., Stelmakh, D., Shkurat, I., Savitsky, V., Toldo, R., Alessi, A. (2025) Determination of a TV tower verticality using UAVs, RTK and photogrammetry. In: *VIIth International Conference «Welding and Related Technologies»*, Yaremche, Ukraine, 7–10 October 2024, pp. 149–153. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003518518-30>
12. Lobanov, L., Stelmakh, D., Savitsky, V., Diadin, V., Shutkevych, O., Shkurat, I. (2024) Damage detection and analysis using unmanned aerial vehicles (UAVs) and photogrammetry method. *Procedia Structural Integrity*, 59, 43–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.008>

13. Lobanov L.M., Stelmakh D.I., Saviцький В.В., Дядін В.П., Шуткевич О.П., Козачек А.Г. (2023) Дистанційна оцінка пошкоджень кийської телевежі на основі застосування аерофотозіомки та методу фотограмметрії. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 3, 16–20. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.03.03>
- Lobanov, L.M., Stelmakh, D.I., Savitsky, V.V., Diadin, V.P., Shutkevych, O.P., Kozachek, A.G. (2023) Remote assessment of damage to Kyiv TV tower based on the application of aerial photography and photogrammetry method. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 3, 16–20 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.03.03>
14. Onososen, A., Musonda, I., Onatayo, D., Tjebane, M., Saka, A., Fagbenro, R. (2023) Impediments to construction site digitalization using unmanned aerial vehicles (UAVs). *Drones*, 7(1), 45. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones7010045>
15. Albeaino, G., Gheisari, M., Franz, B.W. (2019) A systematic review of unmanned aerial vehicle application areas and technologies in the AEC domain. *J. of Information Technology in Construction (ITcon)*, 24, 381–405. DOI: <https://doi.org/www.itcon.org/2019/20>
16. Ham, Y., Han, K.K., Lin, J.J., Golparvar-Fard, M. (2016) Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped unmanned aerial vehicles (UAVs): A review of related works. *Visualization in Engineering*, 4, 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40327-015-0029-z>
17. Pant, S., Nooralishahi, P., Avdelidis, N.P., Ibarra-Castaneda, C., Genest, M., Deane, S. et al. (2021) Evaluation and selection of video stabilization techniques for uav-based active infrared thermography application. *Sensors*, 21, 1604. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21051604>
18. Ciampa, E., De Vito, L., Rosaria Pecce, M. (2019) Practical issues on the use of drones for construction inspections. *J. of Physics: Conference Series*, 1249, 012016. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1249/1/012016>
19. Duque, L., Seo, J., Wacker, J. (2018) Synthesis of unmanned aerial vehicle applications for infrastructures. *J. Perform. Constr. Facil.*, 32(4). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001185](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001185)
20. Rakha, T., Gorodetsky, A. (2018) A review of unmanned aerial system (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones. *Aut. in Constr.*, 93, 252–264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.002>
21. Wu, W., Qurishee, M.A., Owino, J., Fomunung, I., Onyango, M., Atolagbe, B. (2018) Coupling deep learning and UAV for infrastructure condition assessment automation. In: *2018 IEEE International Smart Cities Conference, ISC2, 2018 Sep 16–19, Kansas City, MO, USA*. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISC2.2018.8656971>
22. Gu, J., Wang, Z., Kuen, J., Ma, L., Shahroudy, A., Shuai, B., Liu, T., Wang, X., Wang, G. (2016) Recent advances in convolutional neural networks. *Pattern Recognition*, 77, 354–377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.10.013>
23. Gulgec, N.S., Takáč, M., Pakzad, S.N. (2017) Structural damage detection using convolutional neural networks. In: *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, pp. 331–337. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-54858-6_33
24. Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G. (2012) Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 25(2), 1097–1105. DOI: <https://doi.org/10.1145/3065386>
25. Lee, S.Y., Tama, B.A., Moon, S.J., Lee, S. (2019) Steel surface defect diagnostics using deep convolutional neural network and class activation map. *Applied Sciences*, 9(24), 5449. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9245449>
26. Tabernik, D., Šela, S., Skvarc, J., Skocaj, D. (2020) Segmentation-based deep-learning approach for surface-defect detection. *J. of Intelligent Manufacturing*, 31(3), 759–776. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01476-x>
27. Prappacher, N., Bullmann, M., Bohn, G.; Deinzer, F.; Linke, A. (2020) Defect detection on rolling element surface scans using neural image segmentation. *Applied Sciences*, 10(9), 3290. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10093290>

28. Li, J., Su, Z., Geng, J., Yin, Y. (2018) Real-time detection of steel strip surface defects based on improved YOLO detection network. *IFAC-PapersOnLine*, 51(21), 76–81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.412>
29. Wei, R., Song, Y., Zhang, Y. (2020) Enhanced faster region convolutional neural networks for steel surface defect detection. *ISIJ International*, 60(3), 539–545. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.isijint-2019-335>
30. Cha, Y.-J., Choi, W., Buyukozturk, O. (2017) Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(5), 361–378. DOI: <https://doi.org/10.1111/mice.12263>
31. Hutchinson, T., Chen, Z. (2006) Improved image analysis for evaluating concrete damage. *J. of Computing in Civil Engineering*, 20(3), 210–216. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2006\)20:3\(210\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2006)20:3(210))
32. Dung, C., Sekiya, H., Hirano, S., Okatani, T., Miki, C. (2019) A vision-based method for crack detection in gusset plate welded joints of steel bridges using deep convolutional neural networks. *Automation in Construction*, 102, 217–229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.013>
33. Shen, H.-K., Chen, P.-H., Chang, L.-M. (2013) Automated steel bridge coating rust defect recognition method based on color and texture feature. *Automation in Construction*, 31, 338–356. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.003>
34. Xu, Y., Bao, Y., Chen, J., Zuo, W., Li, H. (2018) Surface fatigue crack identification in steel box girder of bridges by a deep fusion convolutional neural network based on consumer-grade camera images. *Structural Health Monitoring*, 18(3), 653–674. DOI: <https://doi.org/10.1177/1475921718764873>
35. Prasanna, P., Dana, K.J., Gucunski, N. et al. (2016) Automated crack detection on concrete bridges. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 13(2), 591–599. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASE.2014.2354314>
36. An, Y.-K., Jang, K.-Y., Kim, B., Cho, S. (2018) Deep learning-based concrete crack detection using hybrid images. In: *Proc. SPIE 10598, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, 1059812. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2294959>
37. Chow, J.K., Su, Z., Wu, J., Tan, P.S. et al. (2020) Anomaly detection of defects on concrete structures with the convolutional autoencoder. *Advanced Engineering Informatics*, 45, 101105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101105>
38. Miranda, J., Veith, J., Larnier, S., Herbulot, A., Devya, M. (2019) Machine learning approaches for defect classification on aircraft fuselage images acquired by an UAV. In: *Fourteenth International Conference on Quality Control by Artificial Vision*, Vol. 11172, 1117208. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2520567>
39. Avdelidis, N.P., Tsourdos, A., Lafiosca, P., Plaster, R., Plaster, A., Droznika, M. (2022) Defects recognition algorithm development from visual UAV inspections. *Sensors*, 22(13), 4682. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22134682>
40. Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T. (2015) U-net: convolutional networks for biomedical image segmentation. In: *Proceedings of the Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI 2015)*, 234–241. <http://lmb.informatik.uni-freiburg.de/people/ronneber/u-net>
41. Ren, J., Wang, H. (2023) Calculus and optimization. In: *Mathematical Methods in Data Science, Chapter 3*. Elsevier, pp. 51–89. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-44-318679-0.00009-0>

ENHANCING LARGE-SCALE STRUCTURE DIAGNOSTICS THROUGH UAV-BASED DATA AND NEURAL NETWORK ANALYSIS

L.M. Lobanov, I.L. Shkurat, D.I. Stelmakh, O.P. Shutkevych, V.V. Savitsky

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: innashkurat2909@gmail.com

The article presents an approach to remote diagnostics of damage to large-sized engineering structures using unmanned aerial vehicles (UAVs) and convolutional neural networks. The study was conducted to automate the process of detecting structural defects in the Kyiv TV tower. The research methodology involved the collection and preprocessing of 14187 images and the development of a modified architecture of the U-Net neural network for damage segmentation. An experimental study of different architectural settings of the model demonstrated the effectiveness of the proposed modifications, which reduced the error of defect detection by 3...5 % compared to the baseline models. It was found that the optimal number of training iterations is 15–20 epochs. The developed model demonstrated the ability to detect damage that may be missed by the operator, which confirms the potential of automated diagnostic systems based on artificial intelligence. The study provides new prospects for improving the efficiency of monitoring infrastructure facilities, especially in conditions of limited access or increased risks to personnel. 41 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Keywords: remote diagnostics, defects, artificial intelligence, neural networks, image segmentation, UAVs

Отримано 06.03.25

Отримано у переглянутому вигляді 04.04.25

Прийнято 08.05.25

3D ДРУК ДЕТАЛЕЙ З РІЗНИХ КОМБІНАЦІЙ МЕТАЛІВ

Дослідники зробили значний прорив у галузі 3D друку металів, розробивши технологію створення легких і міцних багатокомпонентних деталей.

Вченим вдалося успішно об'єднати в одній деталі сталь і алюміній, що раніше вважалося складним завданням через ризик утворення крихких з'єднань різних металів.

Ключем до успіху стала лазерна порошкова плавка Laser Powder Bed Fusion (L-PBF).

Завдяки 3D друку можна створювати деталі з унікальною геометрією, що дасть змогу оптимізувати конструкцію автомобілів і знизити їхню вагу. Крім того, нова технологія дасть змогу виробляти екологічно чистіші транспортні засоби, оскільки 3D друк дає змогу скоротити кількість відходів виробництва.



За матеріалами Інтернету

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИХРОСТРУМОВОГО РЕЗОНАНСНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИНИ ШАРУ ПІДСИЛЕНОГО ВУГЛЕЦЕВИМ ВОЛОКНОМ ПЛАСТИКУ НА МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЯХ

В.М. Учанін¹, О.Г. Алещенко¹, А. Савін², В.Я. Дереча³

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

²Nondestructive Testing Department, National Institute of Research and Development for Technical Physics, Iasi, Romania.

E-mail: asavin@phys-iasi.ro

³ДП «Антонов». 03062, м. Київ, вул. Мрії 1.

Досліджено можливість безконтактного вимірювання шару підсиленого вуглецевим волокном пластику (ПВВП) на конструкціях із немагнітного алюмінієвого сплаву та феромагнітної сталі вихрострумним методом. Дослідження проводилося за допомогою плоских зразків із алюмінієвого сплаву Д16Т і феромагнітної сталі Ст20, на які щільно накладали набір пластин завтовшки 1 мм із ПВВП, кількістю яких моделювали різну товщину шару ПВВП. Досліджували вихрострумні перетворювачі (ВСП) параметричного типу у вигляді обмоток з 300 і 600 витків на феритовому осерді діаметром 8 мм (відносна магнітна проникність – 600). Вихідну напругу ВСП досліджували у резонансному режимі на робочих частотах 5; 8,5 і 20 кГц. Отримані залежності напруги на резонансному контурі від товщини ПВВП стали основою для створення приладу для безконтактного вимірювання товщини ПВВП на виробках із алюмінієвих сплавів у діапазоні товщин до 12 мм і феромагнітної сталі у діапазоні товщин до 15 мм. Можливість вимірювання шару ПВВП на металевих конструкціях є актуальною для неруйнівного контролю їх якості під час виробництва, а також для моніторингу цілісності таких шаруватих конструкцій під час експлуатації. Експлуатаційний моніторинг передбачає попереднє визначення товщини шару ПВВП у реперних точках з метою подальшого використання в якості референсних значень. Збільшення результатів вимірювання товщини шару ПВВП у процесі моніторингу в реперних точках відносно референсних значень буде свідчити про утворення розшарувань на межі «метал–ПВВП» або між окремими шарами ПВВП під час експлуатації. Бібліогр. 17, рис. 4.

Ключові слова: підсилений вуглецевим волокном пластик, алюмінієвий сплав, феромагнітна сталь, вихрострумний перетворювач, вимірювання товщини, резонансний режим, робоча частота

Вступ. Композиційні матеріали (КМ) знаходять широке застосування для створення сучасних конструкцій, зокрема в авіаційній і космічній промисловості, суднобудуванні, автомобілебудуванні, що дозволяє суттєво зменшити вагу конструкцій без втрати несучої здатності й надійності та скоротити витрати палива [1, 2]. КМ почали розроблятися у 50-х роках минулого століття для заміни металевих конструкційних сплавів. Основна мета полягала у поєднанні двох і більше складових з різними фізичними властивостями для досягнення характеристик, які не властиві кожному матеріалу окремо. Слід зазначити, що об'єм використання деталей із КМ в авіаційній та космічній галузі постійно зростає. Зокрема, на ДП «Антонов» КМ використано в конструкціях літаків АН-26, АН-28, АН-32, АН-70, АН-71, АН-72, АН-74, АН-124 і АН-225 [3]. Відомі лідери літакобудування Boeing, Airbus та Saab АВ створюють літаки, кількість КМ різного типу в яких за вагою досягає 60 %. Окреме місце займають волокнисті КМ, в яких використовують

різні матриці у поєднанні з волокнистим наповнювачем. Це можуть бути склопластики, які можна вважати діелектриками, оскільки вони складаються із скловолокна та матриці на основі епоксидної смоли. Широко розповсюдженим КМ є підсилений вуглецевим волокном пластик (ПВВП), який складається з вуглецевих волокон і полімерної матриці (Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composite) [4–6]. Вони можуть бути багатшаровими з різною орієнтацією (наприклад, 0°, 45°, 90°) вуглецевих волокон у різних шарах. ПВВП є чи не ідеальним матеріалом для створення літаків, оскільки їх міцність порівнюють зі сталлю за питомою вагою приблизно удвічі меншою, ніж у алюмінієвих авіаційних сплавів. Властивості такої багатшарової структури поєднують високу міцність вуглецевих волокон з пружністю матричного наповнювача. Загалом ПВВП мають унікальні властивості, до яких, крім вищезгаданих, можна додати низький коефіцієнт термічного розширення, високу демпфувальну здатність та корозійну стій-

Учанін В.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9664-2101>, Савін А. – <https://orcid.org/0000-0001-9863-3110>,

Дереча В.Я. – <https://orcid.org/0000-0003-1773-912X>

© В.М. Учанін, О.Г. Алещенко, А. Савін, В.Я. Дереча, 2025

кість [7]. ПВВП мають також високу стійкість до циклічних навантажень, але краще працюють за одновимірних навантажень. Це, крім усього іншого, спонукає до поєднання ПВВП з традиційними металами [8], оскільки конструкції літаків піддаються складнішим тривимірним навантаженням.

З поширенням КМ зростає необхідність створення нових технологій неруйнівного контролю (НК), оскільки існуючі методи та засоби НК не завжди дозволяють вирішити відповідний комплекс нових задач [9, 10]. Проблеми НК виникають через різноманітність пошкоджень і дефектів, які властиві тільки КМ і суттєво відрізняються від тих, що характерні для традиційних матеріалів. До таких характерних дефектів ПВВП можна віднести погану адгезію між компонентами, що призводить до розшарувань різного типу, порушення орієнтації волокон у різних шарах тощо.

Загалом ПВВП можна віднести до гетерогенних структур, що складаються щонайменше з двох однорідних складових (вуглецеве волокно та полімерна матриця), які мають виражені поверхні розділу та суттєво відрізняються за електрофізичними властивостями. Стосовно вихрострумowego методу важливо, що полімерна матриця є діелектриком, а вуглецеве волокно має достатньо високу питому електричну провідність (ПЕП). Крім того, волокниста структура ПВВП створює різну ПЕП у різних напрямках, тобто існує щонайменше одновісна анізотропія ПЕП, яка у різних шарах може відрізнитися через різний напрямок вуглецевих волокон. Тут доречно використовувати запропонований нами підхід, який полягає у введенні для гетерогенних матеріалів поняття ефективного середовища, теорія властивостей яких знаходиться на стадії створення. Для ПВВП можна використати наближення ефективного середовища, коли гетерогенний матеріал (ПВВП) будемо умовно вважати гомогенним (однорідним) з ефективною ПЕП, яка залежить від кількісного складу компонентів. Можна припустити, що ефективна ПЕП, враховуючи різну ПЕП і анізотропію ПЕП компонентів ПВВП, буде суттєво більшою, ніж у полімерної матриці, але меншою, ніж у вуглецевого волокна. Наближення ефективного середовища використовувалося нами для дослідження можливості визначення вмісту міді в мідних рудах, де гетерогенність матеріалу обумовлена низькою ПЕП діориту (вміщуюча порода) і халькогеніту (мідного колчедану), який має суттєво вищу ПЕП [11]. Поняття ефективної ПЕП використано нами також для аналізу впливу анізотропії ПЕП на сигнал вихрострумowego перетворювача (ВСП) з круговими обмотка-

ми [12]. Підхід ефективного середовища і термін «ефективна коерцитивна сила» використано й для дослідження параметрів петлі магнітного гістерезису шаруватих об'єктів, що складаються з шарів з різними магнітними характеристиками [13].

Останнім часом виникла проблема вимірювання товщини шару ПВВП на металевих конструкціях, яка важлива не тільки для НК подібних шаруватих конструкцій під час виробництва. Перспективним завданням є проведення моніторингу цілісності ПВВП під час експлуатації конструкцій, яке пов'язане з можливим утворенням розшарування як на межі ПВВП з металевою основою, так і всередині ПВВП. Відомі методи вимірювання товщини ПВВП не дозволяють розв'язати цю задачу. На перший погляд, задача виглядає подібною до задачі вимірювання товщини діелектричних покриттів. Але відомі вихроструміві товщині діелектричних покриттів непридатні для вимірювання товщини ПВВП через його порівняно велику ПЕП і, відповідно, швидке загасання вихрових струмів на використаних робочих частотах [14, 15]. Ідея вирішення задачі вимірювання шару ПВВП на металевій основі полягає у зменшенні робочої частоти, коли ПВВП стає «прозорим» і його ПЕП не буде суттєво впливати на глибину проникання вихрових струмів.

Мета роботи – дослідження можливості вимірювання товщини ПВВП на конструкціях і виробках із алюмінієвого сплаву та феромагнітної сталі на основі використання ВСП параметричного типу в резонансному режимі; визначення оптимальні робочі частоти та діапазону вимірювання, необхідних для створення відповідного приладу.

Параметри досліджуваного ВСП, методика дослідження, дослідницькі зразки. Для дослідження використано резонансний режим вихрострумowego контролю, який передбачає включення ВСП у послідовний або паралельний коливальний контур зі збудженням від зовнішнього генератора [15–17]. Важливо, що це дозволяє виділити інформаційну складову зміни імпедансу ВСП з відлаштуванням від впливу неконтрольованого параметра P_3 , що розглянемо на прикладі включення ВСП у послідовний коливальний контур, варіант якого наведено на рис. 1. Ємність та опір резонансного контура вибирають такою, щоб вихідна напруга $U_{\text{вих}}$ не залежала від змін неконтрольованого параметра P_3 .

Діаграму повного імпедансу робочого контура під час встановлення ВСП на немагнітний об'єкт контролю (ОК) з певним початковим значеннями

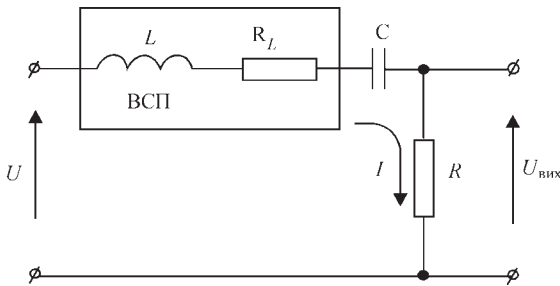


Рис. 1. Схема включення ВСП параметричного типу в послідовний коливальний контур

параметрів імпедансу ВСП (точка P_0) наведено на рис. 2.

На діаграмі (рис. 2) показано внесок кожної зі складових у формування вектора повного імпедансу послідовного контура (точки A, B, C і P_0). Значення опору резистора R та ємності конденсатора C і, відповідно, його реактивного опору вибирають такими, щоб вектор повного імпедансу Z_0 утворював прямий кут з дотичною TT' до лінії впливу неконтрольованого параметра P_3 у точці P_0 . У цьому випадку зміна параметра P_3 у певних межах (точка D) практично не викликає зміни модуля імпедансу контура. У той же час зміна контрольованого параметра P_K (перехід у точку E) суттєво впливає на його модуль. За умови постійної амплітуди вхідної напруги та параметрів елементів контура, амплітуда вихідної напруги визначається тільки модулем імпедансу контура. Тому вона буде мало змінюватися за змін неконтрольованого параметра P_3 , але одночасно буде суттєво залежати від контрольованого параметра P_K . Аналогічні можливості щодо

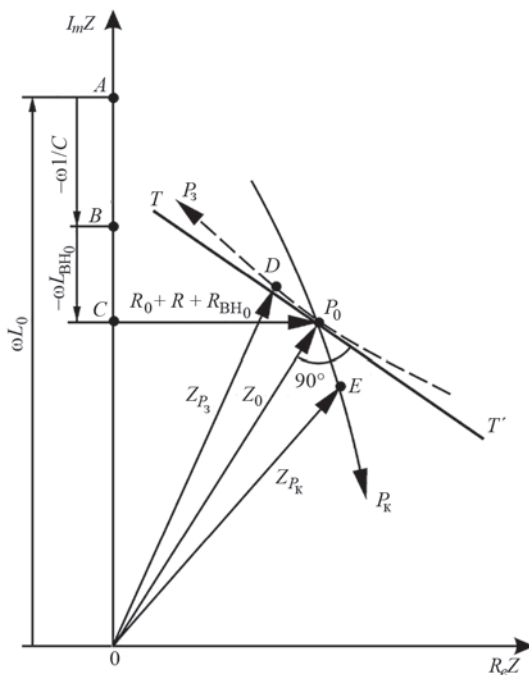


Рис. 2. Впливи контрольованого P_K та неконтрольованого P_3 параметрів на діаграмі комплексних опорів ВСП

відлаштування від неконтрольованого параметра можна отримати також при включенні ВСП у паралельний коливальний контур.

Для дослідження виготовлено два ВСП параметричного типу: один з обмоткою з 300 витків, намотаних дротом діаметром 0,09 мм, інший – з обмоткою з 600 витків. В обох ВСП обмотки встановлено на кінці феритового осердя діаметром 8 мм завдовжки 40 мм. Відносна магнітна проникність матеріалу осердя – 600. Зовнішні діаметри обмоток ВСП – 9,5 і 11 мм відповідно, довжина обмоток – 8 мм. Індуктивності ВСП при розташуванні їх у «повітрі» (на відстані від електропровідного матеріалу) складали 5,2 мГн (ВСП з 300 витків) і 15 мГн (ВСП з 600 витків).

Дослідження проводили за допомогою плоского прямокутного зразка завтовшки 3 мм розмірами 10×10 мм із алюмінієвого сплаву Д16Т та аналогічного зразка з вуглецевої сталі Ст20 завтовшки 2 мм. Під час досліджень на металеві зразки щільно накладали набір плоских пластин із ПВВП, які надані ДП «АНТОНОВ». Товщина кожної пластини – 1 мм. Різну товщину шару ПВВП імітували різною кількістю пластин (від 1 до 15). Дослідження змін вихідної напруги резонансного контура із шаром ПВВП на алюмінієвому сплаві проводили на робочих частотах 5; 8,5 і 20 кГц. Вплив товщини шару ПВВП на феромагнітній сталі Ст20 досліджували на робочій частоті 5 кГц.

Аналіз отриманих результатів. На рис. 3, а наведено залежність вихідної напруги U на резонансному контурі від товщини h_c шару ПВВП на металевому зразку із алюмінієвого сплаву на робочих частотах 5; 8,5 і 20 кГц. На рис. 3, б наведено залежність чутливості S_{hc} вихідної напруги від товщини h_c шару ПВВП, яку оцінювали як різницю амплітуд вихідної напруги за збільшення товщини шару ПВВП на 1 мм у різних частинах діапазону.

Наведені результати (рис. 3) демонструють принципову можливість вимірювання товщини шару ПВВП у діапазоні до 12 мм на конструкціях із алюмінієвих сплавів вихрострумовим методом на вибраних робочих частотах. Амплітуди вихідної напруги зростають зі збільшенням товщини h_c на досліджуваних робочих частотах, асимптотично наближуючись до значень вихідної напруги під час розміщення ВСП у «повітрі», які мають значення 3,27; 6,95 і 8,1 В для робочих частот 5; 8,5 і 20 кГц відповідно. Видно, що швидкість зростання обернено пропорційна значенню товщини h_c ПВВП, що підтверджується відповідними залежностями чутливості S_{hc} на рис. 3, б, форму яких можна вважати близькими до експоненти. При

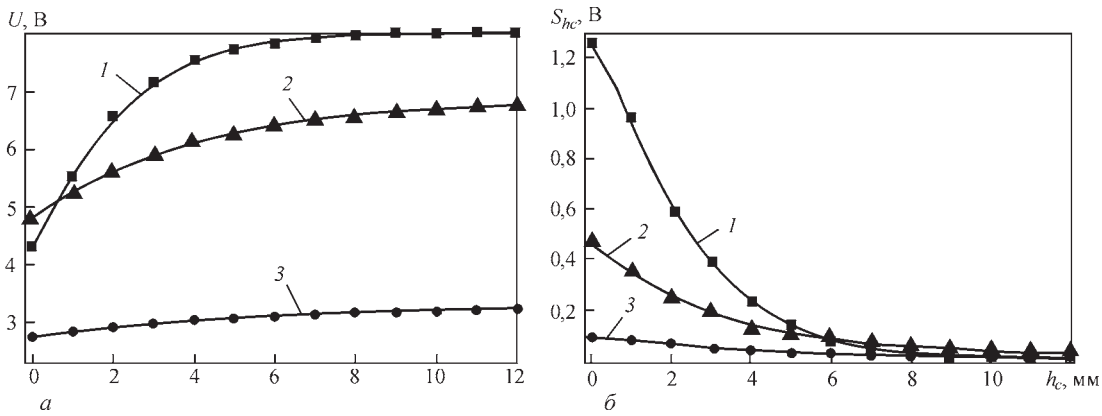


Рис. 3. Залежність вихідної напруги U і відповідні залежності чутливості S_{hc} від товщини h_c шару ПВВП для зразка із алюмінієвого сплаву на робочих частотах: 1 – 20 кГц, 2 – 8,5 кГц, 3 – 5 кГц

цьому на робочій частоті 20 кГц отримано максимальні зміни вихідної напруги (від 4,29 до 8,04 В) при збільшенні товщини ПВВП від нульового значення до 12 мм. Для менших робочих частот відповідні зміни напруги є суттєво меншими: від 2,74 до 3,27 В на частоті 5 кГц і від 4,78 до 6,78 В на частоті 8,5 кГц. Таким чином, робочу частоту 20 кГц можна вважати оптимальною для вимірювання товщини ПВВП на конструкціях із алюмінієвих сплавів, тим більше, що й чутливість на цій робочій частоті є найбільшою, особливо на початковій ділянці в діапазоні змін товщини ПВВП.

На рис. 4, а наведено залежність вихідної напруги U на резонансному контурі від товщини h_c шару ПВВП на зразку зі сталі Ст20 на робочій частоті 5 кГц, а на рис. 4, б – відповідну залежність чутливості S_{hc} вихідної напруги від товщини h_c шару ПВВП на сталі Ст20.

Наведені на рис. 4 результати також демонструють можливість вимірювання товщини шару ПВВП на конструкціях із феромагнітної сталі на робочій частоті 5 кГц. Тут можливий діапазон вимірювання товщини ПВВП досягає 15 мм, що можна пояснити сильнішим впливом феромагнітної сталі на індуктивність ВСП. Видно, що за-

лежності на рис. 3, а і рис. 4, а є симетричними відносно горизонтальної осі. Але, на відміну від попередніх залежностей для немагнітного алюмінієвого сплаву, тут амплітуда вихідної напруги зі збільшенням товщини h_c зменшується за законом, близьким до експоненціального, асимптотично наближаючись до значення 3,25 В, що відповідає вихідній напрузі під час розміщення ВСП у «повітрі». Це легко пояснюється протилежним впливом немагнітного та феромагнітного металу на зміну індуктивності ВСП. За наближення ВСП до немагнітного металу його індуктивність зменшується і, навпаки, індуктивність ВСП збільшується при взаємодії з феромагнітним об'єктом. Швидкість зменшення вихідної напруги обернено пропорційна значенню товщини h_c ПВВП у всьому діапазоні товщин, що підтверджується відповідними кривими чутливості S_{hc} на рис. 4, б. Нагадаємо, що ця властивість пропорційності між швидкістю зміни величини та самою величиною є характерною для експоненціальної залежності. Очевидно, що таку нелінійність отриманих на рис. 3, а, б залежностей необхідно врахувати під час розроблення резонансного приладу для вимірювання товщини шару

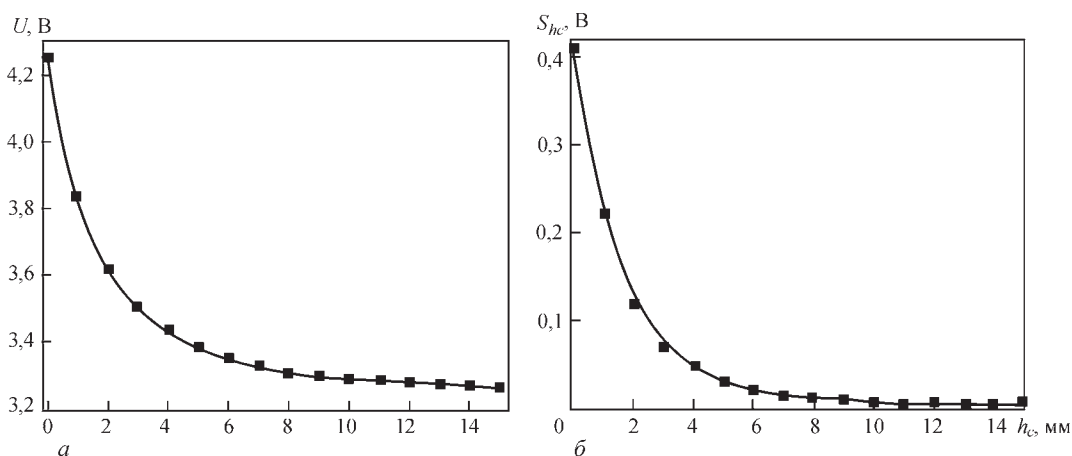


Рис. 4. Залежність вихідної напруги U (а) і відповідні залежності чутливості S_{hc} (б) від товщини h_c шару ПВВП для зразка із феромагнітної сталі Ст20 на робочій частоті 5 кГц

ПВВП на металевих конструкціях шляхом введення блоку лінеаризації.

Висновки

Вихрострумовий метод забезпечує можливість безконтактного вимірювання товщини шару ПВВП на металевих конструкціях із немагнітних алюмінієвих сплавів у діапазоні товщин до 12 мм і феромагнітних сталей у діапазоні товщин до 15 мм. Отримані залежності напруги на резонансному контурі від товщини ПВВП буде використано для розроблення експериментального зразка приладу для безконтактного вимірювання товщини шару ПВВП на металевих конструкціях.

Вимірювання шару ПВВП на металевих конструкціях актуальне не тільки для НК якості шаруватих конструкцій типу «метал–ПВВП» під час виробництва. Авторами запропоновано підхід щодо використання розробленого методу для моніторингу цілісності шаруватих конструкцій «метал–ПВВП» під час їх експлуатації, який передбачає попереднє визначення товщини шару ПВВП у реперних точках для використання в якості референсних значень. Збільшення результатів вимірювання товщини шару ПВВП у процесі експлуатаційного моніторингу в реперних точках відносно наперед визначених референсних значень буде свідчити про утворення розшарувань на межі «метал–ПВВП» або між окремими шарами ПВВП.

Список літератури

- Pezzuti, E., Donnici, G. (2014) Structural composites for aircraft design. *ARNP J. of Engineering and Applied Sciences*, 9(10), 1889–1898.
- Кондратьев А.В., Коваленко В.А. (2011) Обзор и анализ мировых тенденций и проблем расширения применения в агрегатах ракетно-космической техники полимерных композиционных материалов. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов (Сборник научных трудов)*. Харків, Національний аерокосмічний університет «ХАІ», 3(67), 7–18.
- Кива Д. (2014) Этапы становления и начала развернутого применения полимерных композиционных материалов в конструкциях пассажирских и транспортных самолетов (1970–1995 гг.). *Авиационно-космическая техника и технология*, 6, 5–16.
- Ozkan, D., Gok, M.S., Karaoglanli, A.C. (2020) Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite materials, their characteristic properties, industrial application areas and their machinability. *Adv. Struct. Mater.*, 124, 235–253. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-39062-4_20
- Othman, R., Ismail, N.I., Pahmi, M.A.A.H. et al. (2018) Application of carbon fiber reinforced plastics in automotive industry: A review. *J. Mech. Manuf.*, 1, 144–154.
- Wisnom, M.R. (1992) On the high compressive strains achieved in bending tests on unidirectional carbon-fibre/epoxy. *Composites Science and Technology*, 43(3), 229–235. DOI: [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(92\)90093-1](https://doi.org/10.1016/0266-3538(92)90093-1)
- (2011) *Machining technology for composite materials: principles and practice*. H. Hocheng ed. Elsevier Science.
- Pramanik, A., Basak, A., Dong, Y. et al. (2017) Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys – A review. *Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing*, 101, 1–29. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.06.007>

- Savin, A., Steigmann, R., Stanciu M.D., Moraras C.I., Dobrescu G. (2024) Evaluation of the mechanical characteristics of CFRP composites and modeling of the delamination phenomenon. *The Paton Welding J.*, 12, 30–34. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.12.05>
- Шарабура О.М., Муравський Л.І., Кудь О.Г. (2024) Виявлення круглих підповерхневих дефектів у шаруватих композиціях за допомогою оптико-акустичної системи неруйнівного контролю. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 4, 18–22. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.04.03>
- Учанін В.М. Рибачук В.Г. (2022). Дослідження можливості вихрострумового контролю слабопровідних гетерогенних середовищ. *Відбір та обробка інформації*, 50(126), 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/vidbir2022.50.005>
- Rybachuk, V.H., Uchanin, V.M., Kulynych, Y.P. (2022) Specific features of testing of anisotropic nonmagnetic materials by eddy-current probes with circular windings. *Materials Science*, 57, 452–458. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00565-2>
- Rybachuk, V.G., Uchanin, V.M. (2023) A recurrent formula for determination of the effective coercive force in layered ferromagnetic materials. *Materials Science*, 58, 533–539. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00695-1>
- Дорофеев А.Л., Никитин А.И., Рубин А.Л. (1978) *Индукционная толщинометрия*. М., Энергия.
- (1986) *Неразрушающий контроль металлов и изделий: Справочник* (ред. Г.С. Самойлович). М., Машиностроение.
- Полулях К.С. (1980) *Резонансные методы измерений*. М., Энергия.
- Арш Э.И. (1979) *Автогенераторные методы и средства измерений*. М., Машиностроение.

References

- Pezzuti, E., Donnici, G. (2014) Structural composites for aircraft design. *ARNP J. of Engineering and Applied Sci.*, 9(10), 1889–1898.
- Kondratiev, A.V., Kovalenko, V.A. (2011) Review and analysis of world tendencies and problems of expansion of application of polymer composite materials in the units of rocket-space technology. In: *Collect. of Design and Production of Flying Vehicle Structures*. Kharkiv, KhAI, 3(67), 7–18 [in Russian].
- Kiva, D. (2014) Stages of formation and beginning of the deployed application of polymer composite materials in passenger and transport aircraft structures (1970–1995). *Aviatsyonno-Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, 6, 5–16 [in Russian].
- Ozkan, D., Gok, M.S., Karaoglanli, A.C. (2020) Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite materials, their characteristic properties, industrial application areas and their machinability. *Adv. Struct. Mater.*, 124, 235–253. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-39062-4_20
- Othman, R., Ismail, N.I., Pahmi, M.A.A.H. et al. (2018) Application of carbon fiber reinforced plastics in automotive industry: A review. *J. Mech. Manuf.*, 1, 144–154.
- Wisnom, M.R. (1992) On the high compressive strains achieved in bending tests on unidirectional carbon-fibre/epoxy. *Composites Sci. and Technol.*, 43(3), 229–235. DOI: [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(92\)90093-1](https://doi.org/10.1016/0266-3538(92)90093-1)
- (2011) *Machining technology for composite materials: Principles and practice*. Ed. by H. Hocheng. Elsevier Science.
- Pramanik, A., Basak, A., Dong, Y. et al. (2017) Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys – A review. *Composites: Pt A: Applied Science and Manufacturing*, 101, 1–29. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.06.007>
- Savin, A., Steigmann, R., Stanciu, M.D., Moraras, C.I., Dobrescu, G. (2024) Evaluation of the mechanical characteristics of CFRP composites and modeling of the delamination phenomenon. *The Paton Welding J.*, 12, 30–34. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.12.05>
- Sharabura, O.M., Muravsky, L.I., O.G., Kuts, O.G. (2024) Detection of circular subsurface defects in laminated composites using optical-acoustic nondestructive testing system. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 4, 18–22 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.04.03>
- Uchanin, V.M., Rybachuk, V.G. (2022) Possibility of eddy current testing of low-conductive heterogeneous media. *Vidbir ta Obrobka Informatsii*, 50(126), 5–12 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/vidbir2022.50.005>

12. Rybachuk, V.H., Uchanin, V.M., Kulynych, Y.P. (2022) Specific features of testing of anisotropic nonmagnetic materials by eddy-current probes with circular windings. *Mater. Sci.*, **57**, 452–458 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00565-2>

13. Rybachuk, V.G., Uchanin, V.M. (2023) A recurrent formula for determination of the effective coercive force in layered ferromagnetic materials. *Mater. Sci.*, **58**, 533–539. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00695-1>

14. Dorofeev, A.L., Nikitin, A.Y., Rubin, A.L. (1978) *Induction thickness measurement*. Moscow, Energiya [in Russian].

15. (1986) *Non-destructive testing of metals and products: Handbook*. Ed. by G.S. Samoilovich. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

16. Polulyakh, K.S. (1980) *Resonant measurement methods*. Moscow, Energiya [in Russian].

17. Arsh, E.I. (1979) *Autogenerator methods and measuring instruments*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

RESEARCH OF THE EDDY-CURRENT RESONANCE METHOD FOR MEASURING THE THICKNESS OF THE CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC LAYER ON METALLIC STRUCTURES

V.N. Uchanin¹, O.G. Aleschenko¹, A. Savin², V.Ja. Derecha³

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

E-mail: vuchanin@gmail.com

²Nondestructive Testing Department, National Institute of Research and Development for Technical Physics, Iasi, Romania.

E-mail: asavin@phys-iasi.ro

³SE «ANTONOV». 1 Mrija Str., 03062, Kyiv, Ukraine

The possibility of non-contact measurement of a carbon fiber reinforced plastic (CFRP) layer on structures made of non-magnetic aluminum alloy and ferromagnetic steel by the eddy current method in resonance mode was investigated. The research was carried out using flat specimens made of aluminum alloy D16T and ferromagnetic steel St20, on which a set of 1 mm thick flat plates made of CFRP were tightly laid. Investigated parametric type eddy current probes (ECP) have windings with 300 and 600 turns installed on an 8 mm diameter ferrite core (magnetic permeability – 600). The ECP output voltages were investigated in the resonant mode at operating frequencies of 5, 8,5 and 20 kHz. The obtained dependences of the output voltage on the thickness of the CFRP layer became the basis for development of a device for non-contact measurement of the CFRP layer thickness on products and structures made of aluminum alloys in the range of thicknesses up to 12 mm and ferromagnetic steel in the range of thicknesses up to 15 mm. The ability to measure the CFRP layer on metal structures is relevant not only for non-destructive inspection of their quality during production, but also for monitoring the integrity of such layered structures during their operation. Operational monitoring envisages preliminary determination of the thickness of CFRP layer in the reference points with the purpose of their further use as reference values. An increase in the results of measuring the thickness of the CFRP layer in the reference points during monitoring relative to the reference values will indicate the formation of delamination at the «metal–CFRP» boundary or between individual CFRP layers in operation.

Keywords: carbon fiber reinforced plastic, aluminum alloy, ferrous steel, eddy current probe, thickness measurement, resonant mode, operating frequency

Отримано 07.04.25

Отримано у переглянутому вигляді 17.04.25

Прийнято 12.05.25

ПЕРЕДПЛАТА 2025

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.				
	місяць	два місяця	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 6 випусків на рік. ISSN 3041-2374 (Print). ISSN 3041-234X (Online). Передплатний індекс 70031	–	300	–	900	1800
«Сучасна електromеталургія», видається з 1975 р., 4 випуски на рік. ISSN 3041-238 (Print). ISSN 3041-2331 (Online). Передплатний індекс 70693	–	–	300	600	1200
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 3041-2366 (Print). ISSN 3041-2358 (Online). Передплатний індекс 74475	–	–	300	600	1200
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X (Print). ISSN 3041-2293 (Online). Передплатний індекс 21971.	600	1200	1800	3600	7200

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

** Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково переклади на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електromеталургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Передплату на журнали можна оформити по каталогах передплатних агенцій «УКРПОШТА», «Прес Центр», «Меркурій» та у видавництвах. Передплата через видавництво з любого місяця на любой термін, в т.ч. на попередні періоди та окремі статті, починаючи з першого року видання.

Передплата на електронну версію журналів. Вартість передплати на електронну версію журналів дорівнює вартості передплати на друковану версію. Випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі pdf. На сайті видавництва у 2024 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2023 рр.

Адреса видавництва

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

03150, Україна, Київ, вул. Казимира Малевича, 11. Тел.: (38044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua; www.patonpublishinghouse.com

APPLICATION OF WAVELET ANALYSIS AND DIFFERENTIAL-INTEGRAL GRAPHICAL METHODS FOR THERMOGRAMS PROCESSING IN THERMAL NONDESTRUCTIVE TESTING

V.O. Storozhenko, O.V. Miahkyi, S.M. Meshkov, R.P. Orel

RTC «Thermocontrol» of Kharkiv National University of Radio Electronics. 14 Nauky Ave., 61166, Kharkiv, Ukraine. E-mail: roman.orel@nure.ua

The problem of increasing the informativeness and reliability of the results of non-destructive testing of high-tech objects of complex structures by the active thermal method is considered. To solve this, we suggest combining the developed integral-differential signal processing method with existing information processing methods based on the formalization of the description of temperature fields. The stages of this transformation are considered: the formation of an operator that characterizes the temperature field that arises on the surface of the control object due to the action of thermal influence and boundary conditions associated with its state and structure. The relations between the stages were analyzed, based on which obstacles and noises were identified that might arise at each of them and thus limit the informativeness and probability of detecting continuity violations. The following sources of interference were considered: non-uniform heating of the surface of the control object and non-uniformity of the adhesive layer under the honeycomb structure cladding. A set of methods for reducing the impact of these interferences is proposed, including wavelet analysis, joint and differential filtering methods, integral analysis methods, decision-making criteria, and classical image processing methods adapted to the infrared range. It has been shown that the use of these methods reduces the interference level to 0.6 °C (instead of 2 °C). The temperature contrast caused by the different thicknesses of the adhesive layer can be reduced to 0.4 °C (instead of 1.2 °C). Statistics obtained during thermal non-destructive testing of a batch of honeycomb samples showed that the probability of detecting suprathreshold defects can reach 90%. 9 Ref., 3 Fig.

Keywords: thermal control, composite structures, interference, wavelet, image processing, method sensitivity

Introduction. The thermal method is widely used for non-destructive testing of critical industrial products, such as complex honeycomb structures used in aerospace engineering. A thermal non-destructive testing (TNDT) system usually consists of a heater (source of thermal excitation), a device for scanning the surface of the test object (TC), and a thermal imager (recording device) [1]. Hidden defects in the TC (for example, cracks and voids) are detected on the thermogram obtained with a thermal imager as local areas with increased or decreased temperature. A useful signal from the defect is the local temperature contrast ΔT . However, such areas also arise for other reasons not related to defects. This may be uneven heating along the surface of the TC, its structural inhomogeneities, etc. As a result, interference occurs that reduces the sensitivity of TNDT systems and the probability of detecting defects.

Problem statement. In the process of TNDT, obstacles arise both in the control object itself and in the environment, and in the recording equipment. Interference can be added to the true temperature signal T (additive interference \tilde{A}) or multiply with it (multiplicative interference \tilde{M}) [2]:

$$u(x, y, \tau) = \tilde{M}T(x, y, \tau) + \tilde{A}$$

It is obvious that the registered signal $u \equiv T$ only if $\tilde{M} \equiv 1$ and $\tilde{A} \equiv 0$.

The best TNDT procedure is one in which the sensitivity of the method is limited by the radiation detector, i.e. $\tilde{M} \equiv 1$ and $\tilde{A} \rightarrow \min$. The limiting value of the registered signal is the passport temperature sensitivity of the thermal imager ΔT_{res} , which reaches in modern models 0.01 °C.

Further improvement of temperature resolution is possible by using the accumulation method [3–5]. However, in natural conditions, air convection and external emitters create noise at approximately 0.1 °C, which can be considered the temperature sensitivity limit of TNDTs in real conditions [6]. Each type of noise can be described in terms of temperature. There are structural $\sqrt{\Delta T_{str}^2}$, hardware $\sqrt{\Delta T_{app}^2}$ and external noise. Using these terms for uncorrelated noise, the signal-to-noise ratio can be determined as [7]:

$$S = \frac{\Delta T_{\tau}}{\sqrt{(\Delta T_{res})^2 + (\Delta T_{str})^2 + (\Delta T_{ext})^2}}$$

V.O. Storozhenko – <https://orcid.org/0000-0002-7609-2955>, O.V. Miahkyi – <https://orcid.org/0000-0002-0442-5570>.

S.M. Meshkov – <https://orcid.org/0000-0003-3464-8318>, R.P. Orel – <https://orcid.org/0000-0002-3592-2393>

© V.O. Storozhenko, O.V. Miahkyi, S.M. Meshkov, R.P. Orel, 2025

where ΔT_{res} – hardware noise; ΔT_{str} – structural noise; ΔT_{ext} – external noise.

When using time parameters, the equivalent time noise can be estimated by the expression [3–5]:

$$\Delta T_{\tau} = \frac{\partial T(\tau)}{\partial \tau} \Delta \tau.$$

External noise is created by the heat flux from surrounding objects, either reflected from the object under inspection or directly entering the thermal imager. Sources of this noise are heaters, the sun, heaters, electric lighting lamps, etc. Direct radiation is eliminated using hoods, screens, filters, etc. The most difficult to eliminate is radiation reflected from the object under inspection. In an active TC, the main source of external noise is the heater. For example, during the optical heating of metals, residual lamp radiation can seriously distort the appearance of thermograms and lead to incorrect estimates of defect parameters if only temperature models of thermal defectometry are used. Therefore, the development of methods for combating interference characteristics of TNDTs and means of increasing the level of the useful signal is an urgent task.

To accomplish the task, thermograms of a honeycomb sample were used, obtained using an infrared camera IRTIS-200 with the following characteristics: spectral range of 3–5 μm , sensitivity of 0.05 $^{\circ}\text{C}$, and spatial resolution of 2 mrad.

The selected class of TC is characterized by such sources of interference as non-uniform heating of the TC surface and non-uniformity of the adhesive layer. In order to reduce the level of each of the interferences, the following methods are proposed:

- two-dimensional discrete wavelet Meyer transform and frequency filtering to reduce the level of non-uniformity of the heater thermal field;
- differential-integral graphic image processing methods to minimize the influence of interference with a characteristic differential profile such as the inhomogeneity of the adhesive layer.

Application of the wavelet analysis. The presence of interference leads to the detection of a non-existent defect, i.e. to a «false alarm», or to the failure to detect an existing defect. New opportunities for interference compensation are provided by the use of the wavelet analysis apparatus. Wavelet transforms of a one-dimensional signal consist in its expansion in terms of the basis ψ , constructed from a localized function (wavelet) and having certain properties of a localized function (wavelet) through scale changes and transfers. Each of the functions of this basis characterizes both a certain spatial (or temporal) frequen-

cy component of the signal and the localization of this component in physical space (or time) [3].

The wavelet analysis apparatus includes a large number of various wavelet transforms [4, 5], but in this work we are interested in one-dimensional and two-dimensional dyadic wavelet transforms.

It is known that a multiscale analysis algorithm has been developed for an orthonormal wavelet basis on a binary lattice [4]. The algorithm is based on the following assumptions:

- the signal space V can be partitioned into hierarchically nested subspaces V_j that do not intersect, and the union of which gives the space in the limit $L^2(\mathbf{R})$;
- for any function $s(t) \in V_j$, its compact version belongs to the space V_{j-1} ;
- there exists a function $\varphi(x) \in V_0$, for which its shifts $\varphi_{0,k} = \varphi(t-k)$, $k \in \mathbb{Z}$ form an orthonormal basis of the space V_0 .

Then since the functions $\varphi_{0,k}(t)$ form an orthonormal basis of the space, the functions $\varphi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \varphi(2^{-j}t - k)$ also form an orthonormal basis V_0 .

The scaling function $\varphi(t)$ (parent wavelet) is commonly called a scalable function because it creates by $\varphi_{j,k}(t)$ scaled versions of itself in the signal space. A signal $s(t)$ can be represented by a set of successive approximations $s_j(t)$ in subspaces V_j . The variable j is called the scale factor. The signal $s(t)$ is the approximation limit $s_j(t) \in V_j$, i.e. $s(t) = \lim_{j \rightarrow \infty} s_j(t)$. Therefore, for small j values, rough approximations $s(t)$ are obtained, and for large values, more accurate ones.

Function $\psi \in L^2(\mathbf{R})$ is called R-function, if for this function the scaling functions $\{\psi_{jk}\}$ form a basis, which is defined by the expression:

$$\psi_{jk}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k), \quad j, k \in \mathbb{Z}, \quad (1)$$

where \mathbb{Z} – the set of integers is a Riesz basis [3, 4]. That is, for the function ψ_{jk} there are two constants A_w and B_w , for which the condition is fulfilled $0 < A_w \leq B_w < \infty$, then the expression

$$A_w \|\{c_{jk}\}\|^2 \leq \left\| \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_{jk} \psi_{jk} \right\|^2 \leq B_w \|\{c_{jk}\}\|^2$$

is a wavelet framework and holds for any (limited by a twice quadratic sum) sequence $\{c_{jk}\}$:

$$\|\{c_{jk}\}\|^2 = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} |c_{jk}|^2 < \infty.$$

The Riesz basis is unconditional, that is, the order of the vectors in it can be arbitrary.

Any localized R-function $\psi \in L^2(\mathbf{R})$ is called an R-wavelet (mother wavelet or simply a wavelet) if there exists a function $\check{\psi} \in L^2(\mathbf{R})$ for it (its pair, twin) such that the families $\{\psi_{jk}\}$ and $\{\check{\psi}_{jk}\}$, are constructed according to (1) and:

$$\check{\psi}_{jk}(t) = 2^{-j/2} \check{\psi}(2^{-j}t - k), \quad j, k \in \mathbb{Z},$$

are even bases of the functional space $L^2(\mathbf{R})$. Here $\{\check{\psi}_{jk}\}$ – is pair of the basis $\{\psi_{jk}\}$ in the sense that the scalar multiplication of these functions satisfies the condition:

$$\langle \psi_{jk}, \check{\psi}_{lm} \rangle = \delta_{jl} \delta_{km},$$

where δ_{jl}, δ_{km} are Kronecker symbols.

In the general case, the signal reconstruction at the n -th resolution level is given by the expression:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{j_n, k} \varphi_{j_n, k}(t) + \sum_{j=j_n}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j, k} \psi_{j, k}(t), \quad (2)$$

where $a_{j_n, k}$ and $d_{j, k}$ – approximating and detailing coefficients at the n -th level of decomposition, respectively. They are determined by the ratios:

$$a_{j_n, k} = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \varphi_{j_n, k}(t) dt, \quad d_{j, k} = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi_{j, k}(t) dt. \quad (3)$$

The wavelet $\psi(t)$ determines the fine structure of the analyzed signal, and the scaling function $\varphi(t)$ is responsible for its coarse approximation [3, 6, 7].

The pair of relations (2) and (3) defines the one-dimensional dyadic wavelet transform.

In the case of a two-dimensional dyadic wavelet transform, the one-dimensional signal under investigation $s(t)$ is replaced by a function of two variables $s(x, y)$, of which an image is a special case.

Then the wavelet basis also becomes a function of two variables:

$$\begin{aligned} \psi_{j, k}(V) &= 2^{-j/2} \psi(2^{-j}V - k), \\ \varphi_{j, k}(V) &= 2^{-j/2} \varphi(2^{-j}V - k), \end{aligned} \quad (4)$$

where $V(x, y) \in L^2, (j, k) \in L^2$.

Thus, for image processing, it is better to use the two-dimensional dyadic Meyer wavelet transform, which is defined by relations (2) and (3) using relations (4).

A raster image is a discrete signal to which two-dimensional discrete wavelet transforms can be applied. The proposed idea of combating interference in TNDT by wavelet image processing is as follows. First, using a direct two-dimensional dyadic wavelet transform, we decompose the original image using the maximum possible number of decomposition levels. Then we equate all approximating and detailing coefficients at this maximum decomposition level to zero and restore the image using an inverse two-dimensional dyadic wavelet transform. The described transformations were tested on an infrared image using the discrete Meyer wavelet, resulting in a significantly corrected spatial distribution of the thermal field (Fig. 1). The proposed algorithm implements the application of a low spatial frequency filter to the original image and removes thermal field variations with the largest spatial scales [6]. This does not lead to a loss of information about defects, since their characteristic spatial scales are usually smaller. The criterion for selecting a wavelet transform from a large number of wavelets was the features of the geometry of the thermal field created by the heater [8]. Taking into account the properties of the sample thermogram, a discrete Meyer wavelet was selected. In this case, it is quite smooth, and therefore was used in these studies. The result of the processing is shown in Fig. 1. To further reduce the level of interference, other processing methods must be used.

The resulting contrast image (Fig. 1, c) allows us to identify areas with probable locations of defects, but their precise determination requires the use of additional methods of modern image processing equipment.

Using differential-integral graphic methods of image processing. Along with wavelet transforms, additional filtering methods were used to increase the reliability of control results. To eliminate certain types of interference caused by the heterogeneity of the cellular panel structure, a number of additional joint filtering methods were used. The combined approach

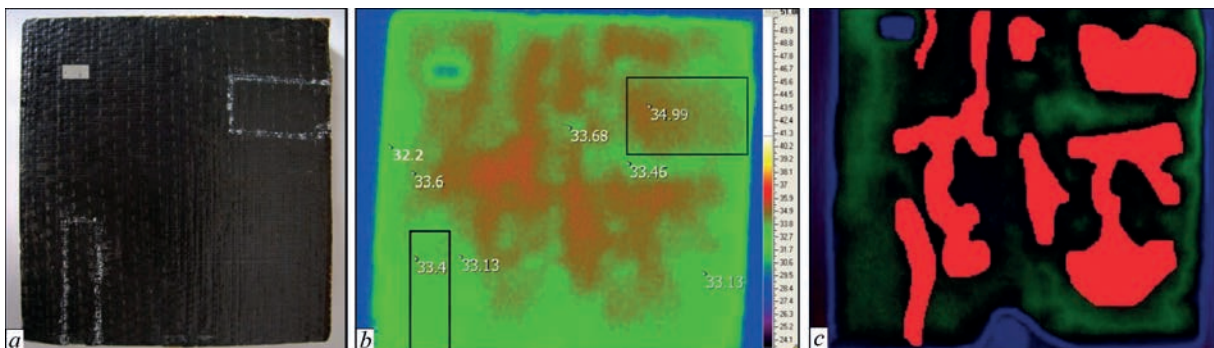


Fig. 1. Thermogram processing: a – visible image of a sample of a honeycomb panel (CB Yuzhnoye) with carbon fiber skins and paper filler with hidden defects of the «not glued» type; b – thermogram; c – corrected spatial distribution of the thermal field

significantly increased the reliability of the TNDT method. If the reliability of the developed method is considered as the probability of correct processing of results, then it is formed as the inverse probability of the total probability of two erroneous decisions [6]:

$$P^* = 1 - (P_1 + P_2) / 2, \quad (5)$$

To increase the capacity and effectiveness of point estimates of risks of the first and second kind, which also reflect the probabilities of these erroneous decisions, it is necessary to conduct multiple experiments to check clearly non-defective and clearly defective samples [9].

It is known that the statistical probability of a defect detection event is equal to the ratio of the number of favorable outcomes to the total number of possible outcomes [9]:

$$P(A) = \frac{m}{n},$$

where $P(A)$ is probability of an event A ; m – number of favorable outcomes to event A ; n – total number of possible outcomes. From this it can be seen that the more accurate each individual measurement, the more accurate the entire control, therefore it is advisable to use an additional method of differential filtering.

To eliminate the second type of interference caused by the non-uniformity of the adhesive layer, it is proposed to use the differential filtration method [7]. It is known that the thickness of the adhesive layer between the honeycombs and the shell is non-uniform. It has been established that the different thickness of the adhesive layer is equivalent to a change in thermal resistance and leads to the appearance of temperature contrasts on the surface of the TC. Analysis of the obtained experimental data showed that these contrasts differ from the useful signal (ΔT caused by a defect) time dependence $\Delta T(\tau)$. This fact was used to construct a method for suppressing this interference by computer processing of thermograms, based on obtaining the derivative $\partial T / \partial \tau$ as a function of the coordinate x for the interference and for the defect containing the TC (Fig. 2).

According to Fig. 2, after processing, the difference between these functions is easily noticeable in the nature of the behavior of the partial derivative of the function F , which for the signal has a positive value in the first phase and a negative value in the second, which for the noise has the opposite value in the corresponding phases. This is the basis of the method. Signals, the partial derivative of which corresponds to noise, are filtered.

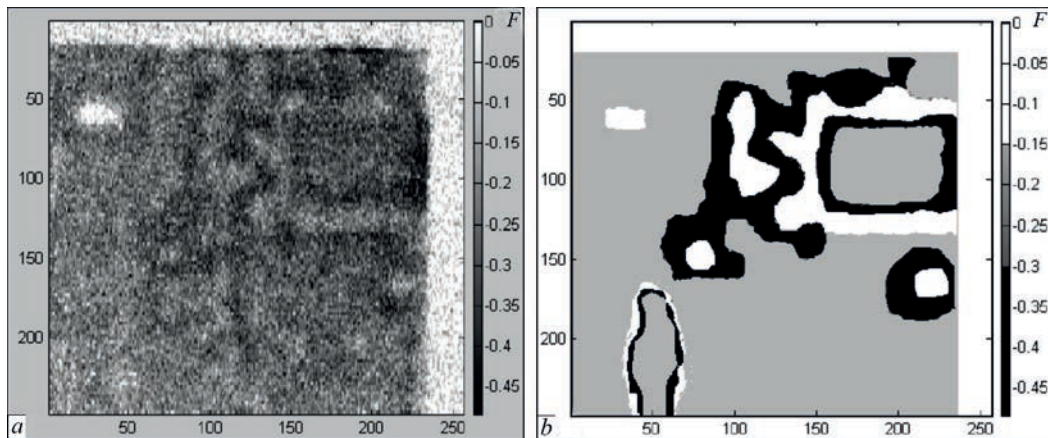


Fig. 2. Image of the two-dimensional dependence of the partial derivative F over time on the coordinates x and y for the original image (a) and after processing (b)

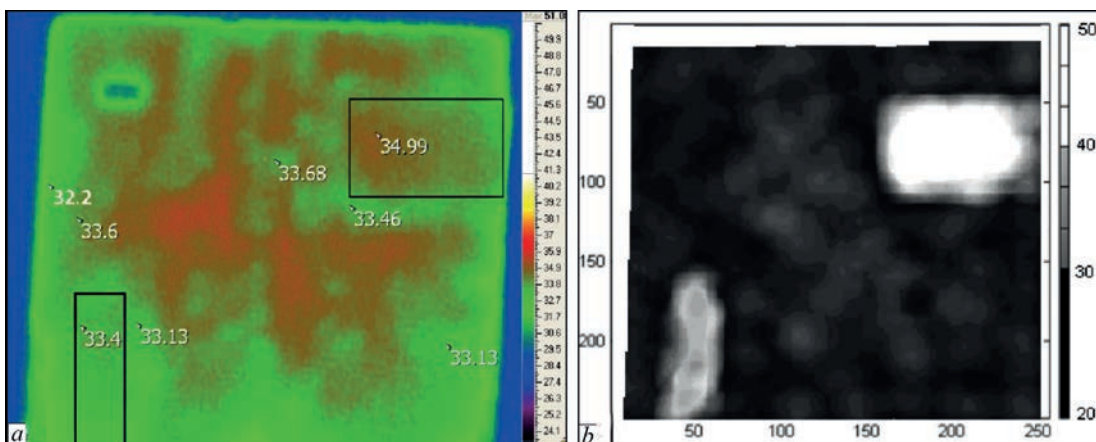


Fig. 3. The result of the final processing of the thermogram of the sample: a – initial thermogram; b – thermogram after processing with detected defects

The essence of the method is to calculate a two-dimensional operator, the elements of which are the corresponding partial derivatives with respect to time [5]:

$$F_{i,j} = \frac{\partial T'_{i,j}(x,y)}{\partial t},$$

where $T'_{i,j}(x,y)$ is element of the operator of corrected temperatures; i, j – integers, corresponding pixel numbers in x and y ; $F_{i,j}$ – element of the characteristic operator.

After calculating the operator (5), the thermogram recovery procedure is carried out, but without signals responsible for a certain interference. The processed thermogram takes the form shown in Fig. 3, *b*. Comparison of this thermogram with the original (Fig. 3, *a*) confirms the fact that the reliability of detecting defects (shown by light spots) has significantly increased after processing [9]. At the same time, the interference level due to the different thickness of the layers of multilayer objects is reduced from 1.2 to 0.4 °C.

Conclusions

Experiments have shown that the use of discrete Meyer wavelet transforms in processing the results of TNDT of a honeycomb panel allowed to reduce the level of interference caused by uneven heating by 2 times from 1.4 to 0.7 °C. This transformation in combination with differential-integral methods allows to significantly increase the sensitivity of the method to detect defects such as «delamination» and «ungluing» in honeycomb structures and other multilayer compositions. As for the interference caused by the inhomogeneity of the emissivity, it was possible to reduce it to 0.6 °C (instead of 2 °C), and the temperature contrast caused by the different thickness of the adhesive

layer was reduced to 0.4 °C (instead of 1.2 °C). Statistics obtained during TNDT of a batch of cellular samples showed that the probability of detecting suprathreshold defects can reach 90%.

The use of the above methods creates all the prerequisites for moving from an individual method of defect identification in production to an automated one based on appropriate technical means.

References

1. Storozhenko, V.A., Maslova, V.A. (2004) *Thermography in diagnostics and nondestructive testing*. Kharkov: Smith [in Russian].
2. Maldague, Xavier P.V. (2001) *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. John Wiley & Sons, Inc.
3. Miahkyi, A.V., Lazorenko, O.V., Storozhenko, V.A. (2013) Processing the results of thermal defectoscopy of honeycomb structures in order to reduce the level of obstacle. *Visnik NTU «HPI», serija «Elektroenergetika ta peretvorjuval'na tehnika»*, **34**, 108–122 [in Russian].
4. Chernogor, L.F., Lazorenko, O.V., Potapov, A.A. (2012) Wavelet analysis of model fractal ultra-wideband signals. *Proceeding of 6th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals*, Sevastopol, Ukraine, 291–293. DOI: <https://doi.org/10.1109/UWBUSIS.2012.6379809>
5. Bathe, K.J., Wilson, E.L. (1976) *Numerical methods in finite element analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
6. Storozhenko, V., Orel, R., Miahkyi, A. (2016) Optimization of the procedure of thermal flaw detection of the honeycomb constructions by improving the accuracy of interference function. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **5(5)**, 12–18. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79563>
7. Mallat, S.A. (2008) *Wavelet tour of signal processing*. The Sparse Way, Academic Press, N.Y.
8. Lazorenko, O.V., Chernogor, L.F. (2009) *Ultra-wideband signals and processes*. Kharkiv: V.N. Karazin Kharkiv National University [in Russian].
9. Storozhenko, V.O., Meshkov, S.M., Orel, R.P., Miahkyi, O.V. (2022) Reducing the level of interference at thermal non-destructive testing considering the specific thermal physical and morphological characteristics of the object. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol.*, **4**, 47–51 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.04.04>

ВИКОРИСТАННЯ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ ТА ДИФЕРЕНЦІАЛЬНО-ІНТЕГРАЛЬНИХ ГРАФІЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ОБРОБКИ ТЕРМОГРАМ У ТЕПЛОВОМУ НЕРУЙНІВНОМУ КОНТРОЛІ

В.О. Стороженко, О.В. Мягкий, С.М. Мешков, Р.П. Орел

НТЦ «Термоконтроль» Харківського національного університету радіоелектроніки. 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

E-mail: roman.orel@nure.ua

Розглянуто проблему підвищення інформативності та достовірності результатів неруйнівного контролю високотехнологічних об'єктів складної структури активним тепловим методом. Для її вирішення запропоновано використовувати комбінації розроблених інтегрально-диференціальних методів обробки сигналів у сукупності з існуючими методами обробки інформації, заснованими на формалізації опису температурних полів. Розглянуто етапи цього перетворення: формування оператора, який характеризує температурне поле, що виникає на поверхні об'єкта контролю внаслідок дії теплового впливу та граничних умов, пов'язаних з його станом та структурою. Проаналізовано зв'язки між етапами, на підставі чого виявлено перешкоди та шуми, які можуть виникати на кожному з них і таким чином обмежувати інформативність і вірогідність виявлення порушень суцільності. Для розгляду прийняті такі джерела перешкод, як неоднорідність нагрівання поверхні об'єкта контролю та неоднорідність клейового шару під обшивкою сотової структури. Запропоновано комплекс методів зниження впливу цих перешкод, серед яких вейвлет-аналіз, методи спільної та диференціальної фільтрації, інтегральні методи аналізу, критерії прийняття рішень і класичні методи обробки зображень, які адаптовано до інфрачервоного діапазону. Показано, що застосування вказаних методів знижує рівень перешкоди до 0,6 °C (замість 2 °C). Температурний контраст, викликаний різнотовщинністю клейового шару, вдається зменшити до 0,4 °C (замість 1,2 °C). Статистика, яка отримана при проведенні теплового неруйнівного контролю партії сотових зразків, показала, що вірогідність виявлення надпорогових дефектів може досягати 90%. Бібліогр. 9, рис. 3.

Ключові слова: тепловий контроль, композиційні структури, перешкоди, вейвлет, обробка зображень, чутливість методу

Отримано 29.03.25

Отримано у переглянутому вигляді 18.04.25

Прийнято 12.05.25

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО ТЕСТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ І ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ АПАРАТУРИ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Я. Геріб¹, М.А. Яременко², М.А. Овсієнко², С.А. Недосєка², Д.Д. Топчев², С.О. Кушниренко³

¹Sensophone. 1029 Hungary, Budapest, Honfoglalas u. 28.

²ІЕЗ ім. Є. О. Пагона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: inpat59@ukr.net

³АТ «Одеський припортовий завод». м. Одеса, Головоштамт а/с № 304.

У статті представлено розроблене обладнання та програмне забезпечення для тестування функціональних і вимірювальних параметрів апаратури акустичної емісії. Операції та засоби повірки такого обладнання регламентуються відповідними стандартами та проводяться один раз на рік. Наявність додаткового обладнання та програмного забезпечення у складі систем технічної діагностики дозволяє оперативно визначати та контролювати стан вимірювального обладнання, що підвищує достовірність отриманих результатів. Також це дозволяє підготувати прилади до проходження обов'язкової метрологічної повірки. Бібліогр. 13, рис. 8.

Ключові слова: метрологія, повірка, функціональні параметри, вимірювальні параметри

Вступ. Активне використання систем акустичної емісії (АЕ) як при контролі стану відповідальних промислових об'єктів, так і при проведенні наукових досліджень, значно підвищує вимоги до технічного стану приладів [1, 2]. У забезпеченні єдності та точності вимірів, що є основою для наукових досліджень, технічного прогресу та ефективного виробництва, ключову роль відіграє метрологія як наука про вимірювання та їх застосування [3–5]. Висока точність вимірювань забезпечує достовірність і повторюваність результатів. Саме тому важливу роль відіграють наукові дослідження, спрямовані на вдосконалення методів оцінки точності вимірювань та розробку нових підходів до забезпечення їх якості [6]. За даними Європейської асоціації національних метрологічних інститутів (EURAMET), інвестиції в метрологічні дослідження зросли на 30 % за останні п'ять років, що підкреслює стратегічну важливість цього напрямку для інноваційного розвитку [7].

Для отримання достовірних результатів необхідно, щоб засоби вимірювальної техніки (ЗВТ) своєчасно проходили повірку. Повірка ЗВТ – це сукупність операцій, що містить перевірку та маркування та/або видачу документа про повірку засобу вимірювальної техніки, які встановлюють і підтверджують, що зазначений засіб відповідає встановленим вимогам [8].

Метрологічна повірка ЗВТ є одним з ключових процесів у метрології, що забезпечують точність, достовірність і надійність вимірювань. Це особливо важливо в умовах, де помилки чи похибки можуть

привести до серйозних наслідків. Основна мета повірки – підтвердити, що засіб вимірювання забезпечує результати в межах допустимої похибки.

Системи технічної діагностики Sensophone/ЕМА – зручний і надійний сучасний засіб, що активно застосовується для забезпечення безпечної експлуатації навантаженого промислового обладнання, для виявлення та визначення місцезнаходження небезпечних дефектів, відстеження втомних і корозійних процесів, контролю якості технологічних процесів методом АЕ [9].

Повна перевірка функціональних і вимірювальних параметрів АЕ апаратури є складною та копіткою роботою. Державні стандарти України (це також і європейські та міжнародні нормативні документи, які прийняті як національні стандарти України методом підтвердження) [10–12] та розроблені методики [13] описують найважливіші з цих параметрів і методи їх перевірки. Під час повірки АЕ комплексів (систем) оцінюється зовнішній вигляд обладнання, перевіряється його працездатність і визначаються такі метрологічні характеристики як: власні шуми, нерівномірність АЧХ, динамічний діапазон і абсолютна похибка під час вимірювання рівня амплітуди сигналів АЕ, встановлення рівня порога реєстрування сигналів АЕ, вимірювання часу приходу сигналів АЕ та координат джерел сигналів АЕ.

Проте будь-яка конкретна апаратура має ще багато додаткових параметрів, що підлягають перевірці та/або калібруванню. Повірка систем АЕ проводиться один раз на рік фахівцями ДП

Яременко М.А. – <https://orcid.org/0000-0001-9973-4482>, Овсієнко М.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2202-827X>,

Недосєка С.А. – <https://orcid.org/0000-0001-9036-1413>, Топчев Д.Д. – <https://orcid.org/0000-0002-7885-7907>

© Я. Геріб, М.А. Яременко, М.А. Овсієнко, С.А. Недосєка, Д.Д. Топчев, С.О. Кушниренко, 2025

«Укрметртестстандарт» з видачею відповідного свідоцтва про перевірку законодавчо регульованого ЗВТ. Розвиток обладнання та програмного забезпечення (ПЗ) для проведення контролю відповідальних промислових об'єктів, а також виконання дослідницьких робіт у лабораторних умовах вимагають і змін у проведенні оцінки стану власне обладнання АЕ контролю та діагностування. Особливо це важливо у випадку оперативної оцінки стану промислових об'єктів і прийняття рішення щодо їх зупину або корегування режиму їхньої роботи. Крім того, перевірка дозволяє виявити відхилення в роботі обладнання на ранніх етапах, запобігаючи його виходу з ладу.

Мета роботи – розробка додаткових засобів контролю відповідності систем АЕ технічним характеристикам відповідно до експлуатаційної документації безпосередньо в процесі використання.

Виклад основного матеріалу. Для автоматизації процедури оцінки стану АЕ системи перевіряються, згідно з вимогами вищезазначених НД, на наступні складові.

1. Процедура перевірки датчиків АЕ призначена для: попередження про пошкодження внутрішнього екрану коаксіального кабелю; виявлення непрацюючих датчиків; перевірки працездатності датчиків, які зазнали впливу умов високого ризику (механічні удари, висока температура, високе іонізуюче випромінювання або корозійне середо-

вище, потрапляння води, пошкоджений роз'єм або кабель) та підбору датчиків з ідентичними характеристиками для формування акустичних антен.

2. Визначення рівня власного електричного шуму комбінації «датчик–попередній підсилювач». Рівень шуму не повинен перевищувати рівень власних шумів, вказаний виробником.

3. Перевірка споживання постійного струму попереднім підсилювачем, вимірювання коефіцієнта підсилення і АЧХ, а також вимірювання рівня власних шумів.

4. Перевірка здатності сигнального процесора забезпечити цифрову обробку сигналів АЕ у реальному масштабі часу.

5. Перевірка пікової та неперервної швидкості отримання сигналу АЕ для системи.

Максимальна швидкість, з якою комп'ютер може зчитувати дані з АЕ каналів, обробляти та зберігати їх, залежить від: максимальної швидкості передачі інформації між контролером АЕ каналу та контролером АЕ системи, АЕ контролером і ПК, ПК і жорстким диском; об'єму даних кожного хіта, продуктивності центрального процесора; складності online аналізу даних і наявності сервісних завдань операційної системи (наприклад, сканер вірусів). Усі відповідні параметри повинні бути ретельно визначені та записані для відтворюваності перевірки.

Детальніші рекомендації щодо частоти, динамічного діапазону, прийнятної похибки кожного



Рис. 1. Мультиплексор тестових сигналів та осцилограф/генератор сигналів PicoScore 2006B/2008B

вимірювання та інші необхідні складові наведені у вищевказаних стандартах. На основі цих вимог до перевірки складових АЕ систем і порядку її виконання було розроблено та створено обладнання та відповідне ПЗ, що інтегрується до загального ПЗ системи АЕ, для перевірки роботи систем АЕ Sensophone/ЕМА. Розроблена система автоматичного тестування (АТ) може також використовуватись і для інших аналогічних систем.

Апаратура системи АТ функціональних і вимірювальних параметрів приладів АЕ складається з мультиплексора тестових сигналів та USB-осцилографа/генератора сигналів PicoScope 2006B/2008B (50 МГц, частота вибірки 500 Мб/с, 8 біт АЦП, 32 Мб пам'яті) (рис. 1).

Обидва пристрої підключаються окремо до портів USB керуючого комп'ютера та приєднані один до одного коротким кабелем BNC. Система доповнюється 16-ма короткими коаксіальними LEMO кабелями для підключення виходів мультиплексора до входів тестованого АЕ приладу, а також кабелем для роз'єму зовнішніх низькочастотних (НЧ) параметрів (рис. 2). Останній є у двох варіантах: один – для тестування 4-х каналних приладів Sensophone AED-404(ЕМА-4/4) з одним НЧ входом і трьома логічними входами управління; другий – для 16-ти каналних приладів Sensophone AED 416(ЕМА-4/16) з 5-ма НЧ входами та 8-ма логічними входами управління.

ПЗ системи АТ – це частина загального пакету програмних засобів систем АЕ контролю. Функція тестування обладнання доступна після вибору цієї опції в ПЗ системи в режимі online. Система АТ дозволяє перевірити наступні функціональні та вимірювальні параметри приладу АЕ: коефіцієнт підсилення акустичного сигналу в лінійному режимі підсилення; функцію передачі сигналу підсилювального тракту каналів АЕ в логарифмічному режимі підсилення; сумарний рівень власних шумів підсилювального тракту каналів АЕ в логарифмічному режимі підсилення; АЧХ вхідних

ЛС-фільтрів підсилювального тракту каналів АЕ в лінійному та логарифмічному режимах підсилення; АЧХ підсилювального тракту каналів АЕ з включеним цифровим фільтром у лінійному та логарифмічному режимах підсилення; АЧХ перехресних перешкод каналів до сусіднього каналу АЕ в логарифмічному режимі підсилення.

Слід зазначити, що при перевірці вищевказаних параметрів приладу АЕ датчик АЕ, попередній підсилювач і кабель датчика не використовуються. Амплітуди тестових і реєстрованих сигналів, виражені в дБ, наводяться з урахуванням коефіцієнта підсилення 20 дБ попереднього підсилювача, що входить у реальні ланцюжки «датчик АЕ–апаратура АЕ». З використанням розробленого обладнання перевіряється робота каналів АЕ в режимі тестування шляхом подачі імпульсів на датчик АЕ; контролюються логічні входи управління та вимірювання вихідної напруги та струму.

При тестуванні приладів багатоприладової системи АЕ кожний прилад тестується окремо. Такий прилад повинен бути відокремлений від інших складових багатоприладової системи АЕ та мати установку порту Ethernet, яка дозволяє перехід в online режим вимірювання (автоматично або вручну), а також відповідний код модуля.

У режимі online вікно функції АТ відкривається при виборі вкладки «Випробування обладнання» у рядку вибору основних робочих вікон головного вікна програми (рис. 3).

Корекцію конфігурації системи АТ можна робити за рахунок зміни деяких важливих умов роботи системи. За наявності в системі мультиплексора тестових сигналів можна вибрати послідовний чи паралельний режим вибору каналів АЕ для тестування. Більшість тестів виконуються набагато швидше в паралельному режимі, але є й такий тест (АЧХ рівня перехресних перешкод каналів до сусіднього каналу АЕ в логарифмічному режимі підсилення), який вимагає послідовного режиму. У разі відсутності мультиплексора тестових сиг-

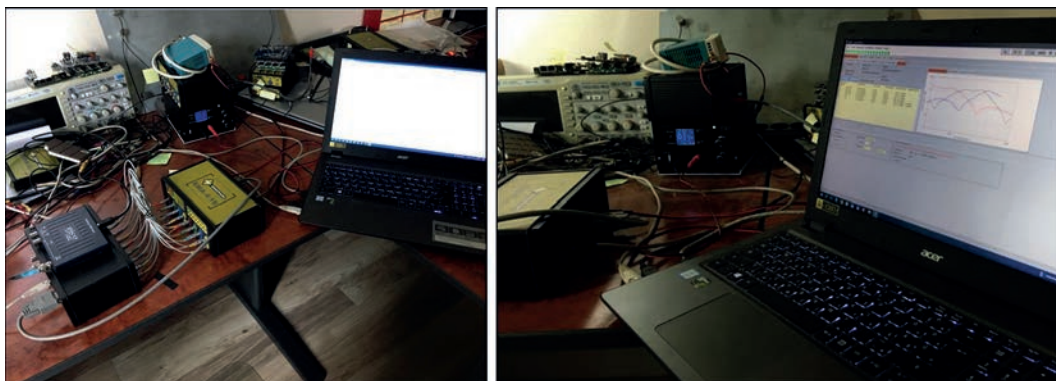


Рис. 2. Перевірка параметрів системи ЕМА-4/16

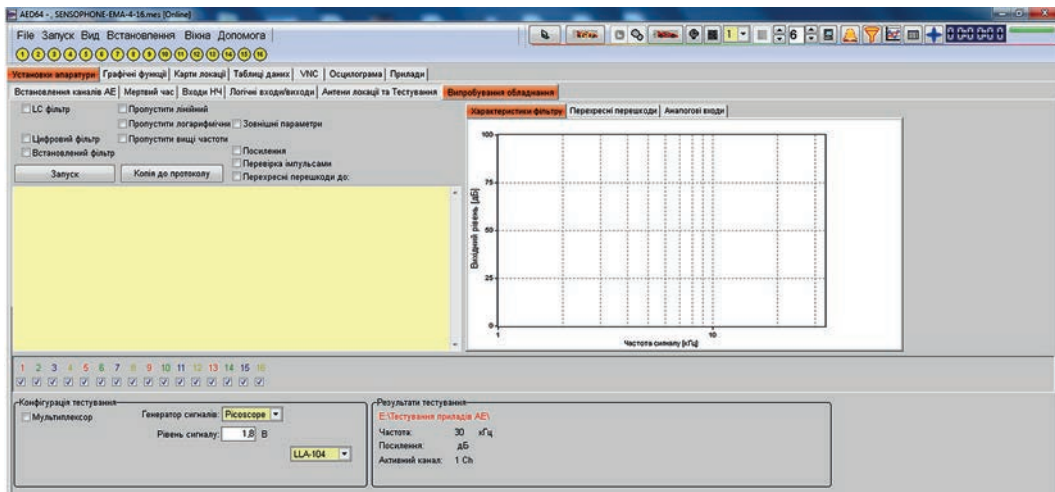


Рис. 3. Вікно функцій автоматичного тестування приладу АЕ

налів можливий лише послідовний режим. Виконання підтестів «Зовнішні технологічні сигнали» виконуються на НЧ каналах завжди послідовно. У віконці «Рівень сигналу» вказано номінальну амплітуду тестових синусоїдальних сигналів. Це значення вибрано для корекції зменшення амплітуди сигналу ненавантаженого 50 Ом-го виходу генератора тестових сигналів після підключення до входу АЕ приладу з вхідним імпедансом 75 Ом. Також можна уточнити тип основних підсилювачів тестованого приладу АЕ. Для тестування каналів АЕ необхідно вибрати відповідні канали (рис. 4).

Для проведення тестування апаратури можна вибрати наступні функції (вузли) приладу для перевірки: підсилення (відношення вихідного рівня сигналу до вхідного за різних режимів підсилення), LC фільтр, цифровий фільтр, рівень шуму, перехресні перешкоди, тестовий імпульс, зовнішній сигнал (рис. 5).

Для прикладу розглянемо, як проводиться тест «Підсилення». На всі виділені для тестування входи АЕ приладу подається неперервний сигнал синусоїдальної форми. Вибираються по черзі різні режими підсилення (загалом існує 12 підтестів), а амплітуда сигналу змінюється в залежності від встановленого режиму підсилення. Частота сиг-

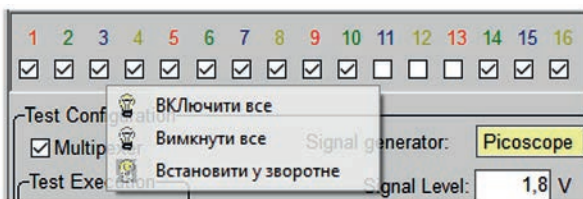


Рис. 4. Вибір каналів для тестування

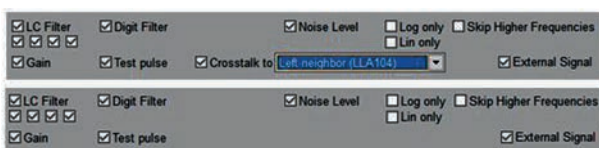


Рис. 5. Вибір функцій (вузлів) для тестування

налу – 175 кГц. LC-фільтр № 4 (30...1000 кГц), цифровий фільтр відключений. Вимірюється параметр «Середній рівень сигналу АЕ» та порівнюється з номінальним значенням амплітуди тестового сигналу.

Для тесту «LC фільтр» на всі виділені для тестування входи АЕ приладу подається неперервний сигнал синусоїдальної форми. Частота сигналу змінюється в діапазоні 30...1000 кГц, номінальна амплітуда сигналу 80 дБ. Цифровий смуговий фільтр вимкнено. Тест виконується двічі: вимірюється параметр «Середній рівень сигналу АЕ» при виборі всіх 4-х-смугових LC-фільтрів спочатку в режимі лінійного підсилення 40 дБ, потім у логарифмічному режимі підсилення.

Для тесту «Цифровий фільтр» на всі виділені для тестування входи АЕ приладу подається неперервний сигнал, як і у випадку попереднього тесту, проте цифровий смуговий фільтр включений з нижніми та верхніми граничними частотами, відповідними смуговим LC-фільтрам 1, 2 і 3, а потім у діапазоні 100...200 кГц. Тест виконується двічі: вимірюється параметр «Середній рівень сигналу АЕ» спочатку в режимі лінійного підсилення 40 дБ, потім – у логарифмічному режимі підсилення.

Для проведення тесту «Рівень шуму» на входи АЕ пристрою подається нульовий сигнал. Установка смугових LC-фільтрів і цифрового смугового фільтра відповідає установкам при тесті «LC фільтр», а потім при тесті «Цифровий фільтр». Вимірюється параметр «Середній рівень сигналу АЕ» лише в логарифмічному режимі підсилення.

Аналогічно проводиться й тест «Перехресні перешкоди», коли вибираються сусідні канали. Тест «Перехресні перешкоди» потребує послідовного режиму тестування.

Для перевірки аналогових входів зовнішніх НЧП на всі входи по чергово подається тестовий

сигнал, який збільшується від 0 до максимального значення 14 рівними ступенями. Спочатку перевіряються НЧ входи в режимі напруги 0...9,375 В, потім – в режимі струмового контура 0...18,75 мА.

Для перевірки логічних входів ліній керування на всі входи подаються тестові коди, які дозволяють перевірити правильність прийому сигналів логічного рівня цими входами. Кількість тестових кодів для 4-х-канального приладу AED404(EMA-4/4) – 6, для 16-ти-канального

AED416(EMA-4/16) – 16. Детальніше всі можливі види тестування описані в документації до системи АТ.

Після корекції конфігурації системи АТ, вибору необхідних тестів, підключення коротких коаксіальних LEMO кабелів і кабелю вимірювання зовнішніх НЧП між відповідними роз'ємами мультиплексора та приладу, що тестується, виконується заплановане тестування. Після запуску тестування можна корегувати вибір тестів або модифікувати виконання тих тестів, які ще не розпочато. Після



Рис. 6. Результати виконання тесту «LC фільтри»

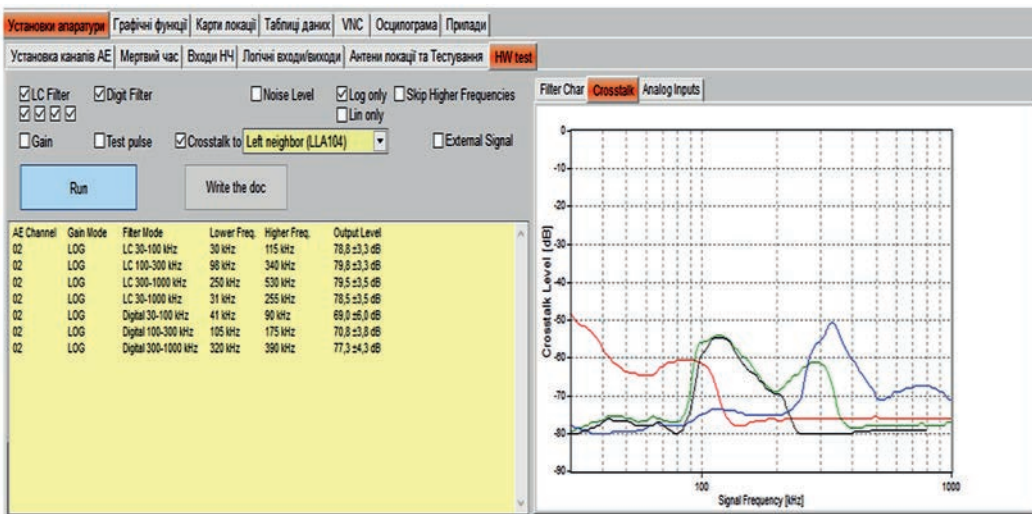


Рис. 7. Результати виконання тесту «Перехресні перешкоди»

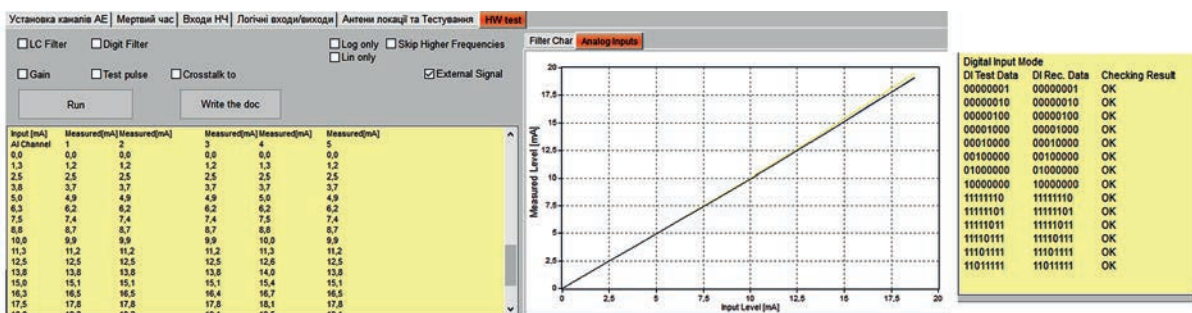


Рис. 8. Результати виконання тесту «Зовнішній сигнал»

виконання останнього тесту створюється спеціальний файл з результатами тестування.

Екрани програми під час тестування вибірково наведено на рис. 6–8.

У програмі також є можливість вибрати модифікацію/прискорення виконання тестів: пропустити тести в лінійному режимі підсилення; пропустити тести в логарифмічному режимі підсилення; тести з сигналами змінної частоти виконувати лише в діапазоні 30...52 кГц. Застосування цих модифікацій значно прискорює контроль апаратури, проте для остаточної та повної перевірки приладу зі складанням відповідного протоколу ці режими не використовуються. Перелік тестів буде розширено для детальнішого аналізу роботи обладнання АЕ контролю та діагностування.

За результатами проведення описаних вище тестів є можливість автоматичного створення протоколу перевірки, що включає всі таблиці та графіки результатів, отриманих у ході тестування.

Висновки

Створено систему автоматичного тестування приладів АЕ контролю та діагностування з урахуванням вимог українських і міжнародних стандартів у галузі АЕ. Прилади та ПЗ для проведення тестування включені в загальну систему АЕ.

Наявність у структурі систем технічної діагностики, зокрема систем Sensophone/ЕМА, обладнання та програм для автоматичного тестування приладів дозволяє в будь-який зручний час і в робочих умовах проводити контроль роботи приладів системи АЕ, що сприяє підвищенню достовірності результатів визначення технічного стану контрольованих промислових об'єктів.

Список літератури

- (2017) *Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: довідковий посіб. у 8 т. Т.5: Акустичні методи контролю деградації матеріалів і дефектності елементів конструкцій*. За ред. З.Т. Назарчука. Львів, Простір-М.
- Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А., Овсієнко М.А. (2020) Системи акустико-емісійного моніторингу при технічному діагностуванні промислових об'єктів. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **3**, 37–42. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2020.03.05>
- (2018) *Метрологія та вимірвальна техніка: підручник*. За ред. В.Д. Кухарчук, В.М. Сlepченко. Київ, Видавничий центр «Академія».
- Лоскутов В.М., Кисельов І.О. (2016) *Основи метрології та електровимірвальної техніки*. Харків, НТУ «ХПІ».
- BIPM (2022) *International vocabulary of metrology – basic and general concepts and associated terms (VIM)*. Joint Committee for Guides in Metrology, 3rd edition.
- Величко В.А., Колбасін О.І., Чепела В.М. (2020) Проблемні питання метрологічної діяльності в умовах реформування національної метрологічної служби. *Український метрологічний журнал: Доповіді XII Міжнародної науково-технічної конференції «Метрологія та вимірвальна техніка» («МЕТРОЛОГІЯ–2020»)*,

- 124–128. DOI: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3A.2020.218544>
7. *Research programme «Strategic Research Agenda 2030»*. Brussels, European Commission.
8. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» № 1314-VII від 5 червня 2014 р.
9. Недосека С.А., Недосека А.Я., Яременко М.А., Овсієнко М.А. та ін. (2019) Особливості АЕ діагностики. Технологія, апаратура, алгоритми. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **1**, 3–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2019.01.01>
10. ДСТУ 9096:2021 *Метрологія. Комплекси діагностичні акустико-емісійні. Методика перевірки*. Київ, ДП «УкрНДНЦ».
11. ДСТУ EN 13477-1:2016. *Неруйнівний контроль. Акустична емісія. Характеристика устаткування. Частина 1. Технічні характеристики устаткування (EN 13477-1:2001, IDT)*. Київ, ДП «УкрНДНЦ».
12. ДСТУ EN 13477-2:2022. *Неруйнівний контроль. Акустична емісія*. Київ, ДП «УкрНДНЦ».
13. МПУ 002/10-22-2004. *Метрологія. АЕ діагностичний комплекс ЕМА (електронна частина). Методика перевірки*. Київ, ДП «УкрНДНЦ».

References

- (2017) *Technical diagnostics of materials and structures: Manual. In 8 Vol., Vol. 5: Acoustic methods for controlling the degradation of materials and the defectivity of structural elements*. Ed. by Z.T. Nazarchuk. Lviv, Prostir-M [in Ukrainian].
- Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A., Ovsienko, M.A. (2020) Systems of acoustic emission monitoring at technical diagnostics of industrial facilities. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **3**, 37–42 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2020.03.05>
- (2018) *Metrology and measuring equipment: Textbook*. Ed. by V.D. Kukharchuk, V.M. Slepchenko. Kyiv, Publ. Center Academiya [in Ukrainian].
- Loskutov, V.M., Kiselyov, I.O. (2016) *Fundamentals of metrology and electrical measuring equipment*. Kharkiv, NTU KhPI [in Ukrainian].
- BIPM (2022) *International vocabulary of metrology – basic and general concepts and associated terms (VIM)*. Joint Committee for Guides in Metrology, 3rd Edition.
- Velychko, V.A., Kolbasin, O.I., Chepela, V.M. (2020) Problem issues of metrological activity in the conditions of reforming the national metrological service. *Ukrainian Metrological J. : Reports of the XII Int. Sci. and Techn. Conf. on Metrology and Measuring Techniques*, **3A**, 124–128 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3A.2020.218544>
7. *Research Programme «Strategic Research Agenda 2030»*. Brussels: European Commission.
8. *Law of Ukraine «On Metrology and Metrological Activities»*, No. 1314-VII of June 5, 2014 [in Ukrainian].
- Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya., Yaremenko, M.A., Ovsienko, M.A. et al. (2019) Features of AE diagnostics. Technology, instrumentation and algorithms. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **1**, 3–12 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2019.01.01>
- (2021) DSTU 9096:2021. *Metrology. Diagnostic acoustic-emission complexes. Methods of verification*. Kyiv, SE UkrNDNC [in Ukrainian].
- (2016) DSTU EN 13477-1:2016. *Non-destructive testing. Acoustic emission. Characteristics of the equipment. Pt 1: Technical characteristics of the equipment (EN 13477-1:2001, IDT)*. Kyiv, SE UkrNDNC [in Ukrainian].
- (2022) DSTU EN 13477-2:2022. *Non-destructive testing. Acoustic emission*. Kyiv, SE UkrNDNC [in Ukrainian].
- (2004) MPU 002/10-22-2004. *Metrology. AE diagnostic complex EMA. Verification procedure*. Kyiv, SE UkrNDNC [in Ukrainian].

SYSTEM FOR AUTOMATIC TESTING OF FUNCTIONAL AND MEASUREMENT PARAMETERS OF ACOUSTIC EMISSION EQUIPMENT

Y. Gereb¹, M.A. Yaremenko², M.A. Ovsiienko², S.A. Nedoseka², D.D. Topchev², S.O. Kushnyrenko³

¹Sensophone. 1029 Hungary, Budapest, Honfoglalas u. 28.

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevich Str., 03150, Kyiv, E-mail: inpat59@ukr.net

³JSC «Odesa Port Plant». Odesa, Main Post Office, PO Box 304.

The paper presents the developed equipment and software for testing the functional and measurement parameters of acoustic emission equipment. The operations and means of verification of such equipment are regulated by the relevant standards and the operations are carried out once a year. The availability of additional equipment and software as part of technical diagnostics systems allows quickly determining and monitoring the condition of measuring equipment, which increases the reliability of the results obtained. It also makes it possible to prepare the devices for mandatory metrological verification. 13 Ref., 8 Fig.

Keywords: metrology, verification, functional parameters, measurement parameters

Отримано 11.03.25

Отримано у переглянутому вигляді 28.04.25

Прийнято 07.05.25

До 155 річчя від дня народження Є.О. Патона



Євген Оскарович Патон народився 4 березня 1870 р. у родині консула російської імперії в м. Ніцці, Франція. Вищу освіту здобув у 1894 р. у Королівській Саксонській технічній вищій школі у м. Дрездені, Німеччина. У 1905 р. Є.О. Патон почав працювати у Київському політехнічному інституті, де очолив кафедру мостів, був вибраний деканом інженерно-будівельного факультету. Він удосконалює навчальні програми, створює лабораторії, інженерний музей, продовжує наукову роботу, видає посібники та підручники. У 1914 р. Є.О. Патон організував мостову секцію при військово-промисловому комітеті Південно-Західного фронту, проектував та організував виготовлення мостів, поворотно-підйомних естакад, льодорізів та інших конструкцій. Для переправ через р. Дніпро розробив проекти 7-ми великих стратегічних розбірних мостів. У 1934 р. уряд УРСР видав постанову про створення Інституту електрозварювання. Директором було затверджено Є.О. Патона. У 1946–1951 рр. під керівництвом Є.О. Патона створено спеціальну

марку низьковуглецевої сталі МСтЗ для зварних мостів, що була малочутливою до термодеформаційного циклу зварювання; нову конструктивну форму мосту; вдосконалено апаратуру для автоматичного і механізованого зварювання конструкцій; розроблено технології заводського і монтажного зварювання. Зразком універсального застосування автоматичного зварювання під флюсом є спорудження першого у світі суцільнозварного автодорожнього мосту через р. Дніпро у м. Києві завдовжки 1543 м. Американське зварювальне товариство (AWS) у 1995 р. визнало міст імені Євгена Патона видатною зварною конструкцією ХХ століття. У 2000 р. Міжнародний інститут зварювання (IIW) заснував міжнародну премію імені Євгена Патона для фахівців, які зробили значний внесок у науку і техніку завдяки своїй життєвій відданості прикладним дослідженням і розробкам в області передових технологій, матеріалів і обладнання для зварювання та суміжних процесів. Є.О. Патон створив відому в усьому світі патонівську науково-інженерну школу, яка стала символом ефективної реалізації фундаментальних наукових розробок і ще зробить багато корисного для розвитку науки і техніки в Україні.



Арочний міст над алеєю Магдебурзького права у м. Києві, побудований у 1910 р.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ УКЛАДАННЯ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ

Я.В. Стешенко, А.Г. Протасов

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: yaroslav.steshik@gmail.com, a.g.protasov@gmail.com

У статті розглянуто питання розробки замкнених автоматизованих систем керування технологічними процесами при укладанні асфальтобетонних покриттів. Замкнені системи, що забезпечують зворотний зв'язок між етапами контролю та виконання, є ключовим елементом сучасної автоматизації технологічних процесів. Їх застосування дозволяє підвищити якість асфальтобетонного покриття, оптимізувати витрати ресурсів і забезпечити відповідність готової продукції нормативним вимогам. Основним результатом дослідження є розробка структурної схеми замкненої системи керування технологічним процесом, яка побудована на принципі оперативного контролю та регулювання технологічних параметрів у процесі укладання асфальтної суміші, що дає змогу адаптувати процеси ущільнення та нагріву асфальтобетону до зміни зовнішніх факторів. Визначено вплив основних технологічних параметрів на якість покриття, запропоновано способи автоматизованого корегування інтенсивності ущільнення залежно від температурних показників. Проведене комп'ютерне моделювання роботи модуля збору оперативних даних дозволило візуалізувати отримані сигнали для подальшого їх аналізу та використання. Результати моделювання підтвердили можливість автоматизації технологічного процесу укладання асфальтобетонного покриття. Запропонована система здатна досягти суттєвого підвищення ефективності та економічності технологічних процесів, що є актуальним у сучасному дорожньо-будівельному комплексі. Бібліогр. 12, рис. 4.

Ключові слова: система керування технологічним процесом, термографія, автоматизація, асфальтобетон, температурний контроль

Вступ. Сучасні технологічні процеси виробництва та укладання асфальтобетонних покриттів вимагають високого рівня точності та відповідності нормативним вимогам. Одним з ключових факторів, що визначають якість асфальтобетону, є дотримання оптимальних температурних режимів під час укладання та ущільнення покриття. Порушення температурного профілю може призводити до виникнення дефектів, таких як: недостатнє ущільнення, тріщини, зниження довговічності покриття та його стійкості до навантажень.

На сьогоднішній день значна частина технологічних процесів у дорожньому будівництві базується на використанні стандартних алгоритмів без урахування реальних умов процесу. Відсутність оперативного зворотного зв'язку між системою контролю та виконання унеможливує корегування параметрів процесу в реальному часі. Це знижує ефективність технологічних операцій та ускладнює досягнення високої якості кінцевого продукту.

У контексті цих проблем актуальним є впровадження замкнених систем автоматизованого керування, які забезпечують постійний моніторинг ключових параметрів, таких як температура асфальтобетону, та їх оперативне корегування. Ін-

теграція сучасних методів контролю, зокрема термографії, у такі системи може значно підвищити якість покриттів і оптимізувати витрати ресурсів.

Мета даного дослідження – розробка замкненої системи автоматизованого керування технологічним процесом укладання асфальтобетону, яка дозволить забезпечити адаптивне керування цим процесом на основі використання методів моніторингу та аналізу даних в реальному часі.

Аналіз останніх досліджень. У сучасному дорожньому будівництві автоматизовані системи керування технологічними процесами відіграють ключову роль у забезпеченні якості та довговічності асфальтобетонних покриттів. Аналіз автоматизованих технологій виявлення та класифікації пошкоджень дорожнього покриття наводиться в [1]. У статті розглядається використання теплових методів неруйнівного контролю для автоматизованого виявлення та класифікації пошкоджень дорожнього покриття. Автори [2] пропонують для діагностики дорожнього покриття використовувати зображення дефектів у двох спектральних діапазонах – у видимому та інфрачервоному. Система, яка реалізує діагностику, перетворює ці зображення до формату, придатного для їх злиття. Такий підхід підвищує вірогідність визначен-

Стешенко Я.В. – <https://orcid.org/0009-0003-5367-1529>, Протасов А.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-2965-3334>

© Я.В. Стешенко, А.Г. Протасов, 2025

ня типу дефектів при їх класифікації. Технології злиття зображень, отриманих у двох діапазонах, знайшли широке застосування в реалізації методів діагностики [3, 4].

Сучасний розвиток інтелектуальних алгоритмів дозволив застосовувати для автоматизації контролю стану доріг нейронні мережі. Так, у [5] пропонується система класифікації тріщин у дорожньому покритті на базі нейронної мережі, яка отримала назву «Road Atlas». Архітектура глибокої згорткової нейронної мережі для автоматизованого виявлення тріщин та їх класифікації була використана в [6]. Ефективність і продуктивність роботи запропонованої мережі з виявлення та визначення параметрів тріщин було проаналізовано та представлено в доповіді на міжнародному симпозіумі авторами [7]. Подальше підвищення ступеня автоматизації технологічних процесів, на думку авторів [8], пов'язане зі створенням замкнених систем керування на базі поєднання процесів діагностики з керуванням технологічними процесами в реальному часі. Незважаючи на значний прогрес у цій сфері, існує потреба в подальшій інтеграції різних методів контролю та керування в єдину замкнену систему. Це дозволить забезпечити комплексний підхід до моніторингу та корегування технологічних параметрів під час укладання асфальтобетону, що, у свою чергу, сприятиме підвищенню якості та довговічності дорожніх покриттів.

Отже, аналіз останніх досліджень свідчить про ефективність використання сучасних методів діагностики в системах автоматизованого керування технологічними процесами. Подальший розвиток у цьому напрямку має бути спрямований на створення інтегрованих замкнених систем, які забезпечать високий рівень автоматизації та адаптивності в умовах реального виробництва.

Виклад основного матеріалу. У процесі укладання асфальтобетону відбувається вимірювання

таких основних технологічних параметрів, як його температура та ущільнення, а результати вимірювань використовуються для їх корегування. На рис. 1 пропонується структурна схема такої замкненої системи.

Запропонована система автоматизованого керування забезпечує динамічну адаптацію до змін умов навколишнього середовища та параметрів асфальтобетону. Робота системи базується на постійному зборі даних, їх аналізі та регулюванні роботи техніки у реальному часі. Алгоритм роботи запропонованої системи полягає в наступному. Блок вимірювання початкових характеристик забезпечує вимірювання ключових технологічних параметрів процесу: температуру навколишнього середовища (T_a), температуру асфальту в бункері (T_b), температуру укладеного асфальту (T_p), вологість середовища (H), густину асфальту та швидкість руху техніки (V). Отримані дані передаються в модуль збору оперативних даних, де дані порівнюються з нормативними (згідно з ТУ) та передаються в блок обробки сигналів, де проходить процес обробки отриманих результатів.

На основі отриманих даних підсистема прийняття рішення розраховує оптимальні параметри:

- температуру нагрівача (T_h), яка забезпечує необхідну температуру асфальтобетону для укладки;
- тиск ущільнення (P), який відповідає вимогам до густини матеріалу залежно від вологості;
- швидкість руху техніки (V), що забезпечує рівномірність і якість укладки.

Підсистема прийняття рішень передає розраховані дані в блок регуляторів, який і забезпечує зміну параметрів керування.

Регулятор нагріву корегує роботу нагрівача для підтримки оптимальної температури асфальтобетону відповідно до профілю температур.

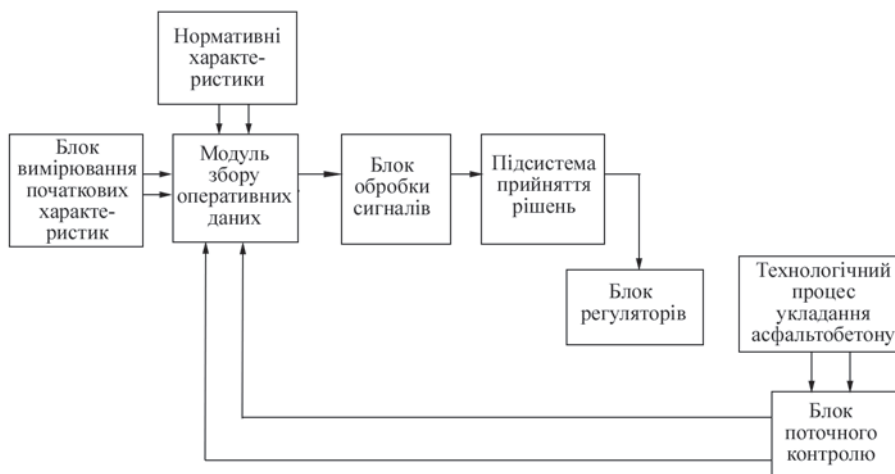


Рис. 1. Структурна схема системи автоматизованого керування технологічним процесом укладання асфальтобетону

Регулятор тиску ущільнення змінює силу ущільнення залежно від густини матеріалу та умов середовища.

Регулятор швидкості адаптує швидкість руху техніки, щоб уникнути перегріву, нерівномірності укладки або надмірного ущільнення.

Після виконання корегувань система отримує оновлені дані від блока поточного контролю, щоб перевірити ефективність внесених змін. Цей зворотний зв'язок забезпечує замкнутий цикл керування, що повторюється до завершення укладки асфальтобетону. У разі відхилення від оптимальних параметрів система автоматично вживає заходів для приведення процесу в межі, задані для забезпечення необхідної якості покриття.

У результаті система забезпечує стабільність процесу, незважаючи на зміну температури навколишнього середовища, сезону, погодних умов або інших зовнішніх факторів, що дозволяє досягти високої якості укладки.

Математичні моделі та алгоритм керування.

1. Модель теплового балансу нагрівача. Для моделювання процесу укладання асфальтобетону важливо розуміти, як температура суміші змінюється в залежності від часу та простору. Під час укладання асфальтобетону температура його поверхні змінюється (знижується) за рахунок конвекційного теплообміну з навколишнім середовищем. Процес теплообміну можна записати наступним чином:

$$Q = \alpha(T_p - T_a), \quad (1)$$

де Q – тепловий потік, що виникає на поверхні асфальтобетону; α – коефіцієнт тепловіддачі поверхні укладеного асфальтобетону; T_p – температура укладеного асфальтобетону; T_a – температура навколишнього середовища.

Оскільки товщина асфальтобетонного покриття у порівнянні з його шириною та довжиною є величиною незначною, то нею можна знехтувати. Тоді зміна температури покриття в часі буде описуватися двовимірним диференціальним рівнянням теплопровідності:

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = \sigma \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \sigma \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2}, \quad (2)$$

де T_p – температура асфальтобетону в точці з координатою (x, y) в момент часу t ; σ – коефіцієнт температуропровідності матеріалу, який залежить від його густини.

Ці рівняння описують зміну температури в укладеному асфальтобетоні з урахуванням процесу теплообміну, часу укладання та властивостей матеріалу асфальтобетону.

Зміна температури нагрівача T_h регулюється з урахуванням температур навколишнього середовища T_a , асфальту в бункері T_b та укладеного асфальту T_p :

$$\frac{dT_h}{dt} = k_1(T_{\text{задане}} - T_h) - k_2(T_h - T_a) - k_3(T_h - T_b), \quad (3)$$

де k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти теплових втрат/регуляції, $T_{\text{задане}}$ – температура, яка визначена в умовах технологічного процесу.

Означені коефіцієнти залежать від потужності нагрівача, теплопровідності матеріалів, теплообміну з навколишнім середовищем та ефективності передачі тепла до асфальту. Коефіцієнт k_1 визначає швидкість досягнення заданої температури, k_2 враховує теплові втрати, а k_3 відображає ефективність нагріву асфальту. Вони обираються на основі експериментальних вимірювань, аналітичних розрахунків рівнянь теплопередачі та методів оптимізації.

2. Модель ущільнення асфальту. Якість ущільнення залежить від тиску катка на асфальт P , його швидкості V та температури укладеного асфальту T_p [9]:

$$\rho = \rho_{\text{max}}(1 - e^{-\alpha P}) \cdot e^{-\beta(T_{\text{опт}} - T_p)^2}, \quad (4)$$

де ρ – щільність асфальту після ущільнення; ρ_{max} – максимальна можлива густина; $T_{\text{опт}}$ – оптимальна температура для ущільнення; α, β – емпіричні коефіцієнти, які визначаються на основі експериментальних даних шляхом калібрування моделі.

Коефіцієнт α залежить від механічних властивостей асфальтобетонної суміші та характеристик ущільнюючого обладнання, а коефіцієнт β – від температурної чутливості процесу ущільнення, теплопровідності матеріалу та впливу навколишніх умов.

3. Модель швидкості руху техніки. Швидкість катка V впливає на рівномірність укладки. Оптимальна швидкість залежить від температури укладеного асфальту T_p і товщини шару асфальту h . Оптимальна швидкість катка визначається [10]:

$$V_{\text{опт}} = C \cdot \frac{h}{T_p - T_a}, \quad (5)$$

де C – коефіцієнт, що враховує теплофізичні та механічні властивості асфальтобетонної суміші, зокрема її теплопровідність, в'язкість і здатність до ущільнення.

Коефіцієнт C визначається емпірично на основі лабораторних випробувань і корегується для конкретного складу асфальту, умов укладання та типу ущільнюючого обладнання.

4. Зворотний зв'язок (регуляція). Регулятори системи працюють за принципом ПД-контролю. ПД-контроль (пропорційно-інтегрально-диферен-

ційний контроль) – це метод автоматичного регулювання, що використовує три складові: пропорційну, що реагує на поточну похибку; інтегральну, що враховує накопичену похибку для усунення систематичних відхилень; диференціальну, що прогнозує майбутні зміни, зменшуючи коливання [11]. Такий підхід дозволяє забезпечити плавне й точне регулювання параметрів у системі. Для регулювання роботи нагрівача асфальту цей метод може бути реалізовано наступним рівнянням:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{dt}{de(t)}, \quad (6)$$

де $u(t)$ – керуючий сигнал (потужність нагріву); $e(t) = (T_{\text{зад}} - T_h)$ – помилка температури; K_p, K_i, K_d – коефіцієнти пропорційного, інтегрального та диференціального контролю.

Коефіцієнти K_p, K_i, K_d обираються експериментально або методами, такими як Ziegler-Nichols, підбір за відгуком системи або оптимізаційні алгоритми.

5. Вплив вологості повітря. Вологість H враховується через корегування тиску ущільнення:

$$P_{\text{кор}} = P(1 - \gamma H), \quad (7)$$

де γ – коефіцієнт, що залежить від типу асфальту.

Коефіцієнт γ обирається експериментально для кожного типу асфальтобетонної суміші, залежно від її складу, вмісту в'язучих матеріалів та пористості. Він визначається на основі лабораторних досліджень ущільнення з різною вологістю або емпіричних даних з реальних укладок.

У запропонованій автоматизованій системі для керування параметрами процесу використовується принцип регулювання з ІМС регулятором. ІМС (Internal Model Control) регулятор – це метод керування, який базується на ідеї, що регулятор має внутрішню модель процесу, яку він намагається підтримувати в межах заданих параметрів. Основна мета ІМС регулятора – мінімізувати помилки в керуванні шляхом корегування параметрів контролера відповідно до математичної моделі об'єкта керування. У загальному випадку передавальна функція системи з ІМС-регулятором по каналу «завдання–регульована величина» матиме вигляд [12]:

$$Y(s) = \frac{W_p(s)W_{\text{об}}(s)Y_3(s)}{1 + W_p(s)[W_{\text{об}}(s)W_M(s)]}, \quad (8)$$

де $Y(s)$ – вихідна змінна системи (регульована величина); $W_p(s)$ – передавальна функція регулятора; $W_{\text{об}}$ – передавальна функція об'єкта керування (процесу); $W_M(s)$ – передавальна функція математичної моделі об'єкта; $Y_3(s)$ – заданий вплив (вхідний сигнал або завдання).

Результуючий закон керування, який дає найкращий результат, для такої системи визначається як:

$$U(s) = \frac{T_{\text{обм}}s + 1}{K_{\text{обм}}(\lambda s + 1)} E(s) + E_a(s), \quad (9)$$

де $T_{\text{обм}}$ – стала часу об'єкта керування; $K_{\text{обм}}$ – коефіцієнт підсилення об'єкта керування; λs – параметр фільтра, що визначає бажану динаміку системи (часто вибирається виходячи з компромісу між швидкодією та стійкістю); $E(s)$ – помилка регулювання, тобто різниця між заданим і поточним значенням вихідної змінної; $E_a(s)$ – додатковий корегуючий сигнал, що може враховувати зовнішні збурення або адаптацію системи.

Цей вираз визначає алгоритм формування керуючого сигналу $U(s)$ на основі помилки регулювання $E(s)$ та додаткового сигналу $E_a(s)$, що забезпечує оптимальну реакцію системи.

Комп'ютерне моделювання роботи системи.

Для підтвердження працездатності запропонованої замкненої системи автоматизованого керування технологічними процесами при укладанні асфальтобетонних покриттів було проведено комп'ютерне моделювання роботи одного з основних складових системи – модуля збору оперативних даних. При моделюванні було використано мову програмування Python. Коди, що були використані, створювали штучні дані для температури й вологості асфальтобетонного покриття та швидкості руху технічних засобів. Розроблена програма дозволяє візуалізувати отримані сигнали для подальшого аналізу. На рис. 2 продемонстровано графік зміни температури асфальтобетонної суміші в бункері, який відображає дані, отримані блоком збору даних у системі керування. Контроль цього параметра є важливим, оскільки занадто низька температура може призвести до поганої якості укладання, а занадто висока – до передчасного висихання матеріалу.

З графіка видно, що спочатку ($t = 0$ с) температура суміші була 150 °С, далі з часом, на 15-й

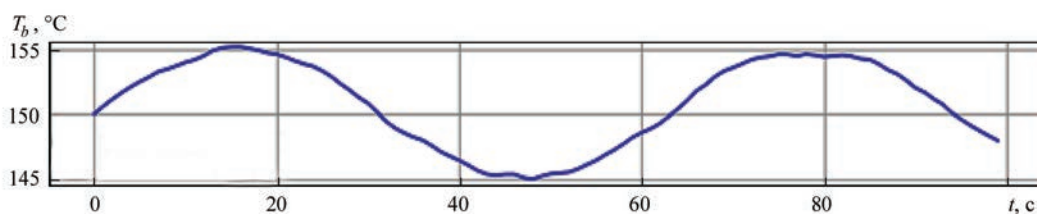


Рис. 2. Розподіл температури асфальтобетонної суміші в бункері

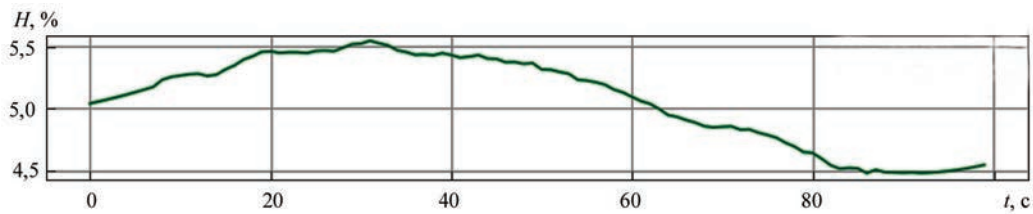


Рис. 3. Зміна рівня вологості матеріалу в бункері

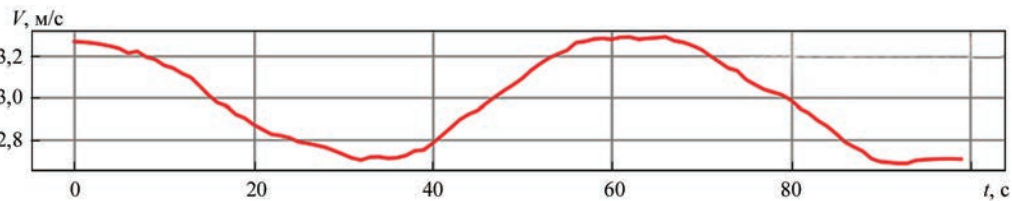


Рис. 4. Зміна швидкості руху асфальтоукладальника

секунді, температура підвищилась до 156 °С. Це означає, що запрацював нагрівач або відбулося накопичення тепла в бункері через недостатнє охолодження. Після цього температура почала зменшуватися, ймовірно, через втрати тепла або припинення роботи нагрівача, та знизилася до 145 °С ($t = 48$ с). Далі температура збільшується за рахунок повторного нагріву або змішування з гарячою сумішшю. На 80-й секунді температура досягає значення 155 °С, після чого знову починає поступово знижуватися, що може бути пов'язано з охолодженням матеріалу в процесі транспортування або з тепловими втратами. У якості висновку графік імітує роботу нагрівача та відображає характер зміни температури під час транспортування та підготовки суміші до укладання.

На рис. 3 показано зміну рівня вологості асфальтобетонної суміші в бункері в процесі транспортування та підготовки до укладання.

Рівень вологості матеріалу є важливим параметром для контролю якості укладання. Висока вологість може знизити адгезію асфальту до основи, а надто низька – негативно вплинути на його еластичність і довговічність. Вологість на момент $t = 0$ с має рівень приблизно 5 %. Протягом перших 40 с спостерігається незначне збільшення вологості до 5,5 %, що може бути пов'язано з конденсацією вологи або змішуванням матеріалу. Після 40-ї секунди рівень вологості починає поступово знижуватися, досягаючи приблизно 4,5 % на 100-й секунді, що, ймовірно, пов'язано з випаровуванням вологи в процесі нагріву матеріалу. У підсумку, графік демонструє зміну рівня вологості асфальтобетонної суміші під час її транспортування та підготовки до укладання. Це дає можливість оцінити ефективність процесу сушіння та передбачити необхідність додаткового контролю параметрів на різних етапах технологічного процесу.

Рис. 4 демонструє зміну швидкості руху асфальтоукладальника.

Початкова швидкість руху асфальтоукладальника становила 3,25 м/с. Далі, з часом, на 25-й секунді, швидкість знизилася до 2,7 м/с. Це може свідчити про уповільнення техніки для точнішого укладання або через нерівності дорожнього полотна. Після цього швидкість починає збільшуватися, ймовірно, у відповідь на стабілізацію процесу укладання, і досягає максимуму 3,3 м/с на 60-й секунді. Потім швидкість знову зменшується, знизившись до 2,7 м/с на 95-й секунді, що може бути пов'язано із завершенням робочого циклу або необхідністю корегування ходу техніки. Представлений графік імітує процес укладання асфальту, де зміна швидкості руху асфальтоукладальника пов'язана з необхідністю дотримання технологічних вимог, рельєфом місцевості або регулюванням подачі матеріалу.

Таким чином, результати комп'ютерного моделювання демонструють адекватність запропонованої моделі контролю технологічних параметрів при реалізації процесу укладання асфальтобетонної суміші.

Висновки

Запропонована структурна схема системи керування технологічним процесом укладання асфальтобетону є замкненою та забезпечує зворотний зв'язок між етапами контролю й виконанням технологічних операцій. Система реалізує автоматизоване корегування параметрів технологічного процесу в залежності від зміни зовнішніх факторів, що забезпечує високу якість укладки дорожнього покриття.

Комп'ютерна модель контролю технологічних параметрів дозволила візуалізувати зміни характеристик технологічного процесу та підтвердила можливість реалізації автоматизованого режиму зміни основних параметрів цього процесу в режимі реального часу.

Список літератури

1. Протасов А.Г., Сторожик Д.В. (2023) Технології автоматизації діагностики дорожнього покриття. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, **34(73)**, 2, 219–227. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/35>
2. Сторожик Д.В., Протасов А.Г. (2024) Автоматизована система діагностики дорожнього покриття з комплексуванням зображень. *Техн. діагност. та неруйнівн. контроль*, **3**, 39–44. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.03.06>
3. Jin, X., Jiang, Q., Yao, S. et al. (2017) A survey of infrared and visual image fusion methods. *Infrared Physics & Technology*, **85**, 478–501. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2017.07.010>
4. Paramanandham, N., Rajendiran, K. (2018) Multi sensor image fusion for surveillance applications using hybrid image fusion algorithm. *Multimedia Tools and Applications*, **77(10)**, 12405–12436. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-017-4895-3>
5. Chen, Z., Zhang, Y., Luo, Y., Wang, Z. et al. (2021) *Roadatlas: intelligent platform for automated road defect detection and asset management*. ATM Multimedia Asia, 1–3. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.03385>
6. Yusof, N.A.M. et al. (2019) Deep convolution neural network for crack detection on asphalt pavement. *J. of Physics: Conference Series*, **1349**, 012020. DOI: <https://doi.org/110.1088/1742-6596/1349/1/012020>
7. Pauly, L., Peel, H., Luo, S., Hogg, D., Fuentes, R. (2017) Deeper networks for pavement crack detection. *34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, pp. 479–485. DOI: <https://doi.org/10.22260/ISARC2017/0066>
8. Мальований М.С., Русин І., Дячок В., Скиба В., Вознюк Н. (2024) *Сталій розвиток: захист навколишнього середовища. Енергозбереження. Збалансоване природокористування. Колективна монографія*. За ред. проф. Мальованого М.С. Київ, Ярченко Я.В. <https://liegudzyk.com/stalyy-rozvytok-zakhyst-navkolyshnoho-seredovyshchakolektyvna-monohrafiya-2024>
9. Delgadillo, R., Bahia, H.U. (2008) Effects of temperature and pressure on hot mixed asphalt compaction: Field and laboratory study. *J. of Materials in Civil Engineering*, **20(6)**, 440–448. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2008\)20:6\(440\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2008)20:6(440))
10. Arbeider, E.A. (2005) *A systems approach to the asphalt construction process: thesis for the degree of Dr. ing. Norwegian University of Science and Technology (NTNU)*. Department of Civil and Transport Engineering. Trondheim.
11. Абдулава Е., Бєдін А. (2014) Аналіз автоматизованих систем управління швидкістю скочування відчепів на сортувальних гірках. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, **146**, 5–8.
12. Ковриго Ю.М., Фоменко Б.В., Степанець О.В. (2010) Система регулювання тепловим навантаженням котла ТПП-210А з використанням регулятора з внутрішньою моделлю. *Вісник економіки транспорту і промисловості*, **10(45)**, 4–7.

Reference

1. Protasov, A.G., Storozhyk, D.V. (2023) Technologies for automation of road surface diagnostics. *Vcheni Zapysky TNU*, Vol. 34(73), 2, 219–227 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/35>
2. Storozhyk, D.V., Protasov, A.G. (2024) Automated road surface diagnostic system with image complexing. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **3**, 39–44 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.03.06>
3. Jin, X., Jiang, Q., Yao, S. et al. (2017) A survey of infrared and visual image fusion methods. *Infrared Physics & Technology*, **85**, 478–501. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2017.07.010>
4. Paramanandham, N., Rajendiran, K. (2018) Multi sensor image fusion for surveillance applications using hybrid image fusion algorithm. *Multimedia Tools and Applications*, **77(10)**, 12405–12436. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-017-4895-3>
5. Chen, Z., Zhang, Y., Luo, Y., Wang, Z. et al. (2021) *Roadatlas: intelligent platform for automated road defect detection and asset management*. ATM Multimedia Asia, 1–3. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.03385>
6. Yusof, N.A.M. et al. (2019) Deep convolution neural network for crack detection on asphalt pavement. *J. of Physics: Conference Series*, **1349**, 012020. DOI: <https://doi.org/110.1088/1742-6596/1349/1/012020>
7. Pauly, L., Peel, H., Luo, S., Hogg, D., Fuentes, R. (2017) Deeper networks for pavement crack detection. *34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, pp. 479–485. DOI: <https://doi.org/10.22260/ISARC2017/0066>
8. Malovanyi, M.S., Rusyn, I., Diachok, V., Skyba, V., Vozniuk, N. (2024) *Sustainable development: environmental protection. Energy saving. Balanced nature management. Collective monograph*. Ed. by Prof. Malyovanyi M.S. Kyiv, Yarochenko Ya.V. [in Ukrainian]. <https://liegudzyk.com/stalyy-rozvytok-zakhyst-navkolyshnoho-seredovyshchakolektyvna-monohrafiya-2024>
9. Delgadillo, R., Bahia, H.U. (2008) Effects of temperature and pressure on hot mixed asphalt compaction: Field and laboratory study. *J. of Materials in Civil Engineering*, **20(6)**, 440–448. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2008\)20:6\(440\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2008)20:6(440))
10. Arbeider, E.A. (2005) *A systems approach to the asphalt construction process: thesis for the degree of Dr. ing. Norwegian University of Science and Technology (NTNU)*. Department of Civil and Transport Engineering. Trondheim.
11. Abdullayev, E.SH., Byedin, A.V. (2014) Analysis of automated systems speed control slide unhook on a separation of bit-ter. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, **146**, 5–8 [in Ukrainian].
12. Kovryho, Yu.M., Fomenko, B.V., Stepanets, O.V. (2010) Thermal load control system of the TPP-210A boiler using a controller with an internal model. *Visnyk ekonomiky transportu i promyslovosti*, **10(45)**, 4–7 [in Ukrainian].

AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF ASPHALT CONCRETE COATING LAYING

Y.V. Steshenko, A.G. Protasov

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.

E-mail: yaroslav.steshik@gmail.com, a.g.protasov@gmail.com

The article considers the issue of developing closed-loop automated process control systems for laying asphalt concrete coating. Closed-loop systems that provide feedback between the control and execution stages are a key element of modern automation of technological processes. Their use allows to improve the quality of asphalt concrete coating, optimize resource consumption and ensure compliance of finished products with regulatory requirements. The main result of the study is the development of a structural diagram of a closed-loop process control system, which is built on the principle of operational control and regulation of technological parameters in the process of laying asphalt mixture. This makes it possible to adapt the processes of compaction and heating of asphalt concrete to changing external factors. The influence of the main technological parameters on the coating quality has been determined, and methods for automated adjustment of the compaction intensity depending on temperature indicators have been proposed. The computer modeling of the real-time data collection module operation has made it possible to visualize the received signals for their further analysis and use. The modeling results confirmed the possibility of automating the technological process of laying asphalt concrete coating. The proposed system is capable of achieving a significant increase in the efficiency and cost-effectiveness of technological processes, which is relevant in the modern road construction complex. 12 Ref., 4 Fig.

Keywords: technological process control system, thermography, automation, asphalt concrete, temperature control

Отримано 10.04.25

Отримано у переглянутому вигляді 21.04.25

Прийнято 13.05.25

ЗАСТОСУВАННЯ ПОСЛІДОВНОГО ВИБІРКОВОГО КОНТРОЛЮ ПРИ ОЦІНЮВАННІ ЯКОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ І ДАТЧИКІВ

М.М. Морозова

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: m.morozova@kpi.ua

Робота присвячена розгляду вибіркового контролю продукції на основі серії стандартів ДСТУ ISO 2859. Проаналізовано положення стандартів, що визначають методологію оцінювання якості партій за альтернативною ознакою, зокрема ДСТУ ISO 2859-5:2009, який регламентує послідовні вибіркові схеми. Визначено основні параметри контролю, включаючи приймальне число дефектів, число відхилення та функцію операційної характеристики. Дослідження спрямоване на адаптацію вибіркового контролю до специфіки контрольованих вимірювальних пристроїв і датчиків, що дозволяє мінімізувати витрати на перевірку, підвищуючи при цьому ефективність прийняття рішень. Наведено математичну модель вибіркового контролю, яка ґрунтується на біноміальному розподілі та дозволяє аналітично оцінити ймовірність прийняття партії продукції залежно від рівня дефектності та розміру вибірки. Проведено обчислення для різних значень вибірки та ймовірності дефектності, що дозволило оцінити вплив параметрів контролю на ймовірність прийняття партії. У якості прикладу розглянуто контроль терморезисторів номінального опору із встановленими допусками. Виявлено, що збільшення вибірки зменшує ризик пропуску дефектних виробів, а при підвищеному рівні дефектності ймовірність прийняття партії суттєво знижується, що демонструє ефективність послідовного вибіркового контролю. Окрему увагу приділено питанням інтеграції вибіркового контролю в процеси забезпечення якості продукції, що передбачає його раціональне застосування та корегування залежно від умов виробництва. Показано, що використання статистичних методів контролю сприяє зменшенню кількості перевірок без втрати ефективності оцінки якості продукції. Також наголошено на необхідності врахування особливостей виробничих процесів для коректного впровадження вибіркового контролю та забезпечення його відповідності нормативним вимогам. Бібліогр. 11, табл. 1.

Ключові слова: план вибіркового контролю, процедура послідовного контролю, контроль якості продукції, контрольовано-вимірювальний пристрій, датчик

Вступ. У сучасному виробництві контрольовано-вимірювальних пристроїв (КВП) і датчиків підтримання високої якості продукції є критично важливим для забезпечення точності та надійності контрольовано-вимірювальних і діагностичних робіт. Це актуально й для українських виробників, які прагнуть відповідати міжнародним стандартам та підвищувати конкурентоспроможність на світовому ринку. У цьому контексті впровадження вибіркового контролю відповідно до серії стандартів ДСТУ ISO 2859 є необхідним кроком для досягнення цих цілей.

Стандарти серії ДСТУ ISO 2859 регламентують статистичні методи вибіркового контролю якості продукції за альтернативною ознакою. Вони забезпечують систематичний підхід до оцінювання якості, що дозволяє зменшити ризики випуску неякісної продукції та оптимізувати витрати на контроль. Це особливо важливо в умовах масового виробництва КВП, де повний (суцільний) контроль кожної одиниці продукції є економічно невиправданим. Впровадження серії стандартів ДСТУ ISO 2859 дозволяє українським виробникам підвищити конкурентоспроможність завдяки відповідності міжнародним вимогам. Систематичне застосування статистичного вибіркового контролю забезпечує

стабільну якість продукції, мінімізуючи варіативність характеристик КВП, оскільки навіть незначні відхилення параметрів можуть призвести до суттєвих похибок у вимірюваннях. Використання статистичних методів контролю дозволяє не лише ефективно ідентифікувати дефекти, а й виявляти системні причини їх виникнення на ранніх стадіях виробництва, що, у свою чергу, сприяє оптимізації технологічних процесів, зменшенню витрат на корегування браку та підвищенню загальної продуктивності. Дотримання принципів вибіркового контролю відповідно до положень ДСТУ ISO 2859 забезпечує високу якість продукції, що є ключовим чинником формування довіри споживачів і партнерів, зміцнення позицій вітчизняних підприємств на внутрішньому ринку та створення передумов для розширення виробничого потенціалу в національній економіці.

Таким чином, актуальність використання серії стандартів ДСТУ ISO 2859 для українських виробників КВП є беззаперечною. Це не лише сприяє забезпеченню високої якості продукції, але й відкриттю нових можливостей для розвитку та зміцнення позицій українських виробників на міжнародному ринку.

Розгляду питань щодо оцінки та контролю якості продукції присвячена значна кількість публікацій. У [1] обґрунтовується застосування ста-

тистичних методів для оцінки якості продукції; описано застосування семи основних методів контролю якості, включаючи діаграми Парето та Ісикави, гістограми та контрольні карти; наголошено, що використання статистичних методів є важливим інструментом для аналітиків, який допомагає приймати ефективні управлінські рішення. Проте автори зосередилися на програмному аналізі без конкретних виробничих ситуацій та розгляду практичних прикладів.

У [2] зазначено основні методи кваліметрії та запропоновано використовувати адитивний метод кваліметрії для визначення комплексного показника якості багатопараметричного об'єкта; окреслено труднощі, що виникають через специфіку технологічного процесу виробництва.

У [3] вдосконалено методичний підхід до оцінювання якості продукції на основі міжнародних і вітчизняних стандартів, включаючи етап ідентифікації вимог до властивостей продукції; запропоновано використовувати не лише базові, а й цільові показники якості для визначення ефективності підприємства. Пропонований підхід дозволяє проводити моніторинг і контроль якості продукції, сприяючи підвищенню конкурентоспроможності підприємств. Водночас, запропоновані рекомендації є доволі загальними.

У [4] запропоновано схему приймального статистичного контролю, побудовану на експертному та комбінованому методах; зазначено, що пропорований алгоритм забезпечить на підприємствах відповідність продукції вітчизняним і міжнародним стандартам, надасть вітчизняним виробникам конкурентні переваги. Проте відсутність реальних прикладів впровадження на конкретних підприємствах не повною мірою розкриває можливості та не підтверджує доцільності застосування отриманих результатів.

У [5] розглядається різниця між класичними підходами до контролю якості в традиційному виробництві та методами, які застосовуються в сфері адитивного виробництва (3D друк); зазначено, що складні геометричні форми та особливості матеріалів, використовуваних в адитивному виробництві, потребують модифікації стандартних підходів до контролю. Проте практичні приклади застосування нових методів не розглянуто.

У [6] досліджено методику вибору параметрів контролю для радіотехнічних систем з урахуванням технічних характеристик і вимог до точності; пропонується підхід до встановлення допустимих відхилень параметрів, що забезпечує підвищення надійності систем. Проте недостатньо розглянуто практичні аспекти реалізації методики контролю в умовах серійного виробництва.

Метою роботи є розгляд потенційних можливостей схем вибіркового контролю, зокрема системи планів послідовного відбирання зразків з партії продукції, індексованих межами прийняття якості, для визначення їхньої придатності до контролю КВП і датчиків, а також створення моделі, яка дозволяє оцінювати ймовірність прийняття або відхилення партії продукції на основі вибірових даних, стосовно КВП і датчиків.

Основні положення серії стандартів ДСТУ ISO 2859. Стандарти ДСТУ ISO 2859 охоплюють різні аспекти вибіркового контролю за альтернативною ознакою. Зокрема, ДСТУ ISO 2859-1:2001 [7] описує систему, де приймальний рівень якості є ключовим параметром. Суть його застосування полягає у стимулюванні виробників підтримувати високу якість процесу виробництва та у зменшенні ризику випадкового прийняття неякісних партій споживачами.

ДСТУ ISO 2859-5:2009 [8] доповнює попередній стандарт, визначаючи загальні послідовні вибірові схеми, що дозволяють гнучкіше та ефективніше підходити до контролю якості в умовах серійного виробництва. Цей стандарт описує загальні послідовні вибірові схеми, що доповнюють плани контролю за альтернативною ознакою, визначаючи межі прийняття якості. Суть застосування – економічно та психологічно змусити виробників дотримуватися стандартів якості, зменшуючи ризик прийняття неякісних партій споживачами.

ДСТУ ISO 2859-10:2009 [9] надає загальне уявлення про теорію приймального контролю за альтернативною ознакою, містить стисле викладення схем вибірки та планів приймання, заснованих на цій ознаці. Дана частина стає в нагоді підприємствам, щоб ефективно контролювати якість продукції, зменшуючи витрати на контроль і підвищуючи точність оцінки якості, впроваджувати методи вибіркового контролю у свої виробничі процеси.

Для виробників КВП і датчиків впровадження вибіркового контролю за стандартами серії ДСТУ ISO 2859 має наступні переваги:

1. Підвищення ефективності виробництва. Застосування вибіркового контролю дозволяє зменшити обсяги перевірок, що скорочує витрати та час на контроль якості без підвищення ризику погіршення якості продукції.

2. Відповідність міжнародним стандартам. Використання цих стандартів забезпечує гармонізацію з міжнародними вимогами, що є ключовим фактором для експорту продукції та розширення ринків збуту.

3. Покращення репутації та довіри споживачів. Систематичний підхід до контролю якості підви-

щує довіру клієнтів до продукції, що сприяє зміцненню позицій компанії на ринку.

Впровадження вибіркового контролю відповідно до серії стандартів ДСТУ ISO 2859 також сприяє розвитку національної промисловості та її інтеграції у світову економічну спільноту. Відповідність продукції міжнародним стандартам відкриває нові можливості для експорту та співпраці з іноземними партнерами. Крім того, підвищується загальний технологічний рівень виробництва та стимулювання впровадження сучасних методів управління якістю.

Застосування стандарту ДСТУ ISO 2859-5:2009 [8] дозволяє підприємствам ефективно керувати ризиками, пов'язаними з якістю продукції. Використання послідовних вибірових схем контролю забезпечує баланс між ризиками виробника та споживача, мінімізуючи ймовірність постачання неякісної продукції на ринок. Це особливо важливо в умовах сучасного ринку, де репутація компанії та підвищення довіри споживачів до вітчизняної продукції є ключовими факторами успіху.

Впровадження статистичного вибіркового контролю вимагає глибокого розуміння методології та правильної інтерпретації результатів. Недостатня обізнаність персоналу або неправильне застосування стандарту можуть призвести до хибних висновків щодо якості продукції. Тому важливо забезпечити належну підготовку фахівців та адаптацію внутрішніх процесів підприємства до вимог стандарту.

У підсумку, впровадження ДСТУ ISO 2859-5:2009 [8] стосовно КВТ і датчиків зумовлене цілями підвищення ефективності контролю якості, зниження витрат і забезпечення відповідності продукції міжнародним стандартам. Це сприятиме зміцненню позицій українських виробників, підвищенню конкурентоспроможності їх продукції на внутрішньому та міжнародному ринках.

Розробка математичної моделі. У контексті інформаційно-вимірювальної техніки, КВП і датчиків особливу увагу приділяють адаптації стандартних методів вибіркового контролю до вимог галузі. Це стосується й розроблення математичних моделей, які враховують особливості контрольовано-вимірювальних засобів і дають змогу оптимізувати процес контролю якості [10]. Такі моделі сприяють підвищенню точності прогнозування якості продукції та зниженню ймовірності постачання дефектних виробів. Окрім того, слід зазначити, що недостатня обізнаність персоналу щодо методів статистичного контролю може призвести до неправильного впровадження схем відбирання та, як наслідок, до зниження ефективності контролю якості. Тому освітні програми, тренінги з цього напрямку мають бути невід'єм-

ною складовою успішного впровадження стандартів. Необхідно забезпечувати належну підготовку персоналу та адаптацію методів контролю до специфічних умов виробництва [11].

Послідовний вибіровий контроль за стандартом ДСТУ ISO 2859-5:2009 [8] передбачає оцінку якості партії продукції шляхом послідовного відбору та перевірки одиниць продукції до формування рішення про прийняття або відхилення партії.

Введемо основні параметри та позначення, що визначатимуть ймовірнісний підхід до контролю якості продукції:

- p – ймовірність дефекту в одиниці продукції, тобто частка дефектних одиниць серед усієї партії;
- n – загальна кількість перевірених одиниць продукції до моменту прийняття рішення;
- d – кількість виявлених дефектних одиниць серед перевірених;
- Ac – приймальне число дефектів, тобто максимальна допустима кількість дефектних одиниць, при якій партія ще може бути прийнята;
- Re – число відхилення, тобто мінімальна кількість дефектних одиниць, після якої партія обов'язково повинна бути відхилена. Зазвичай значення $Re = Ac + 1$.

Ймовірність прийняття партії при дефектності p :

$$L(p) = P(d \leq Ac | n, p), \quad (1)$$

де $P(d \leq Ac | n, p)$ – ймовірність того, що кількість дефектних одиниць d буде меншою або дорівнюватиме Ac (приймальному числу дефектів), за умови, що перевірили n одиниць продукції та ймовірність дефекту в одиниці продукції дорівнює p ; позначення $d \leq Ac$ означає, що кількість дефектних одиниць d має бути меншою або дорівнювати приймальному числу дефектів Ac .

У процесі контролю якості важливо оцінити, наскільки ймовірною є подія, яка полягає в тому, що партія продукції відповідає встановленим критеріям прийнятності. У цьому контексті використовується біноміальний розподіл, який визначає ймовірність кількості дефектних одиниць у вибірці з фіксованого обсягу. Якщо випадковою змінною d позначити кількість дефектних одиниць у вибірці з n перевірених виробів, то ймовірність того, що d прийме конкретне значення k , визначається за допомогою біноміального розподілу:

$$P(d = k | p) = \binom{n}{k} \cdot p^k \cdot (1 - p)^{n-k}, \quad (2)$$

де $P(d = k | n, p)$ – ймовірність події, що серед перевірених n одиниць буде рівно k дефектних одиниць, за умови, що ймовірність дефекту в окремій одиниці продукції дорівнює p ; $(1 - p)$ – ймовірність того, що окремий виріб не є дефектним; $d = k$

означає, що хочемо отримати рівно k дефектних одиниць серед n перевірених; позначення $|n, p$ означає, що ймовірність P визначається з урахуванням двох умов: кількості перевірених одиниць n і ймовірності дефекту в одиничному виробі p ; $\binom{n}{k}$

– біноміальний коефіцієнт, що визначає кількість можливих способів вибору k дефектних одиниць серед n , тобто $\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$. Формула біноміального розподілу дозволяє аналітично визначати ймовірність різних сценаріїв при перевірці якості продукції. Це дає змогу оптимізувати контрольні процедури та мінімізувати витрати при одночасному забезпеченні високої надійності оцінки.

Формула (2) ґрунтується на припущенні, що кожен виріб у вибірці, незалежно від інших, має однакову ймовірність бути дефектним. Це характерно для вибіркового контролю продукції за умови, що вибірка здійснюється з поверненням або якщо розмір партії є значно більшим за вибірку.

Далі, спираючись на (1), встановлюємо ймовірність того, що, якщо перевіримо певну кількість одиниць із партії, кількість виявлених дефектів буде достатньо малою для того, щоб партія була прийнята. Ймовірність прийняття партії, якщо кількість дефектних одиниць d буде від 0 до Ac :

$$L(p) = \sum_{k=0}^{Ac} \binom{n}{k} \cdot p^k \cdot (1-p)^{n-k}, \quad (3)$$

де $\sum_{k=0}^{Ac}$ – сума ймовірностей для всіх можливих значень k від 0 до Ac . Тобто підсумовуємо ймовірності того, що в партії буде 0 дефектів, 1 дефект, 2 дефекти і так далі, аж до Ac дефектів. Формула підсумовує ймовірності для кожного можливого значення k дефектних одиниць (від 0 до Ac).

Кожна складова суми (3) обчислюється за допомогою біноміального розподілу $\binom{n}{k} \cdot p^k \cdot (1-p)^{n-k}$, що дає ймовірність того, що серед n одиниць продукції є рівно k дефектних.

Етапи послідовного контролю та приклади. Процедура послідовного контролю включає наступні етапи:

1. Спочатку перевіряють одиниці продукції одну за одною.
2. Після перевірки кожної одиниці збільшують n на 1. Якщо одиниця є дефектною, тоді збільшують d на 1.
3. Далі формують наступні правила прийняття або відхилення партії:

- якщо $d \leq Ac$, тоді партія приймається;

- якщо $d \geq Re$, тоді партія відхиляється;
- якщо $Ac < d < Re$, тоді продовжують перевірку партії.

Розглянемо приклад контролю партії терморезисторів номіналом 10 кОм при 25°C. У партії максимальне відхилення опору від номінального значення не повинно перевищувати $\pm 3\%$. Припустимо, що для вибіркового контролю встановлені наступні параметри:

- $Ac = 2$ – максимально допустима кількість дефектів;
- $Re = 3$ – число відхилення.

У процесі перевірки партії продукції здійснюється поетапний відбір і тестування окремих зразків до моменту прийняття остаточного рішення щодо всієї партії. Вибірка складається зі 100 одиниць ($n = 100$). Якщо після перевірки виявлено 2 або менше дефектних терморезисторів, тоді партія приймається. Якщо кількість дефектних одиниць досягла 3 або більше, то партія відхиляється.

У таблицях стандарту ДСТУ ISO 2859-5:2009 [8] для кодового знаку розміру вибірки J зазначено, що розмір вибірки знаходиться в діапазоні 80...125 одиниць.

Для детальнішого аналізу проведемо розрахунки ймовірності прийняття партії $L(p)$ за формулою (3) для трьох випадків: для $n = 80$ (мінімальна вибірка), $n = 100$ (середня вибірка) та $n = 125$ (максимальна вибірка) для того, щоб оцінити вплив розміру вибірки на ймовірність прийняття партії. Проміжне значення $n = 100$ було обрано як середнє в інтервалі 80...125. Обчислення ймовірності $L(p)$ для рівня дефектності (ймовірності дефекту в одиниці продукції) $p = 0,02$:

$$\begin{aligned} L(0,02) &= \sum_{k=0}^2 \binom{80}{k} \cdot 0,02^k \cdot (1-0,02)^{80-k} = \\ &= \sum_{k=0}^2 \binom{80}{k} \cdot 0,02^k \cdot (0,98)^{80-k}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L(0,02) &= \sum_{k=0}^2 \binom{100}{k} \cdot 0,02^k \cdot (1-0,02)^{100-k} = \\ &= \sum_{k=0}^2 \binom{100}{k} \cdot 0,02^k \cdot (0,98)^{100-k}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L(0,02) &= \sum_{k=0}^2 \binom{125}{k} \cdot 0,02^k \cdot (1-0,02)^{125-k} = \\ &= \sum_{k=0}^2 \binom{125}{k} \cdot 0,02^k \cdot (0,98)^{125-k}. \end{aligned}$$

Також проведемо обчислення ймовірності для рівнів дефектності $p = 0,01$ та $p = 0,03$. Зведемо

всі розрахунки в таблицю. У вибірковому контролі існує критична межа дефектності продукції, за якою система контролю повинна приймати жорсткіші рішення. Коли рівень дефектності підвищується (наприклад, до 3 %), то ймовірність прийняття партії суттєво зменшується. Це означає, що система вибіркового контролю ефективно реагує на погіршення якості продукції, забезпечуючи захист кінцевого споживача та відповідність стандартам.

Як видно з таблиці, при $p = 0,03$ ймовірність прийняття партії зменшується, у порівнянні з $p = 0,01$ та $p = 0,02$:

- для $n = 80$ прийняття партії ще можливе з ймовірністю $\sim 56,8$ %, що вже є досить ризикованим;
- для $n = 125$ ймовірність прийняття зменшується до 27,3 %, що підтверджує посилення контролю при збільшенні розміру вибірки.

Припустимо, що підприємство випускає великі партії терморезисторів. При цьому обсяг великої партії у виробництві терморезисторів може становити від кількох тисяч до сотень тисяч одиниць залежно від виробничих можливостей та потреб ринку. Якщо частка дефектної продукції становить 1 %, то система вибіркового контролю продовжує приймати більшість партій, оскільки ймовірність виявлення дефектів залишається відносно низькою. Проте зі зростанням рівня дефектності до 3 % ефективність контролю підвищується (посилюється): збільшення обсягу вибірки значно знижує ймовірність проходження бракованої продукції. Це підтверджує, що послідовний вибірковий контроль дозволяє ефективно оцінювати якість партії та забезпечувати дотримання стандартів надійності й точності контрольно-вимірювальних пристроїв, а також їх складових і датчиків.

У даному прикладі дефект – це вихід значення електричного опору терморезистора за встановлені допуски. Якщо опір терморезистора при температурі 25°C виходить за межі допустимого діапазону ± 3 % від номіналу (тобто не потрапляє в інтервал 9700...10300 Ом), тоді такий виріб вважається дефектним.

Послідовні плани відбору одиниць продукції для контролю дозволяють зменшити середню кількість перевірених одиниць порівняно з фіксованими планами, особливо коли якість продукції стабільно висока або низька. Однак вони ви-

магають постійного моніторингу та можуть бути складнішими в реалізації.

Для ретельнішого визначення параметрів планів послідовного відбирання рекомендується звертатися до планів для нормального, послабленого та посиленого перевіряння зі стандарту ДСТУ ISO 2859-5:2009 [8] і скеровуватися табличними значеннями для успішної реалізації процедури вибіркового контролю.

Висновки

1. Аналіз вибіркового контролю за серією стандартів ДСТУ ISO 2859 показав, що використання статистичних методів оцінювання якості продукції дає змогу ефективно знижувати ризики виробника та споживача. Стандарти цієї серії встановлюють чіткі критерії приймання партій на основі визначених граничних значень дефектності, що мінімізує вплив суб'єктивних факторів під час контролю.

2. Впровадження послідовних вибірових схем забезпечує баланс між витратами на перевірку та рівнем контролю якості. Використання стандартних підходів до вибіркового контролю дає змогу підприємствам зменшувати навантаження на перевірочні процеси без втрати ефективності оцінки якості партій. Аналіз стандартів демонструє залежність ймовірності прийняття партії від рівня дефектності та розміру вибірки, що є важливим фактором при серійному виробництві вимірювальних пристроїв.

3. Запропонована математична модель вибіркового контролю ґрунтується на біноміальному розподілі та дає можливість розраховувати ймовірність прийняття партії виробів для різних значень рівня дефектності. Результати моделювання підтвердили ефективність вибіркового контролю: збільшення вибірки знижує ризик пропуску дефектних виробів, а підвищення рівня дефектності сприяє жорсткішим рішенням щодо відхилення партії.

4. Приклад застосування вибіркового контролю до терморезисторів продемонстрував практичну значущість запропонованої моделі. Показано, що використання вибірових схем контролю забезпечує раціональний баланс між витратами на перевірку та рівнем якості продукції, дозволяючи підвищити ефективність процесів приймання продукції.

5. Подальші завдання у цьому напрямі можуть бути спрямовані на адаптацію методів вибіркового контролю до умов виробництва різних типів контрольно-вимірювальних пристроїв і датчиків. Особливу увагу слід приділити вдосконаленню методології розрахунку параметрів контролю з урахуванням варіативності технологічних процесів і розширенню застосування адаптивних схем вибіркового контролю в умовах змінного рівня дефектності виробів.

Обчислення ймовірності $L(p)$ для рівнів дефектності p та кількості вибірок n

Рівень дефектності p	$n = 80$	$n = 100$	$n = 125$
0,01 (1 %)	0,953447	0,920627	0,869316
0,02 (2 %)	0,784419	0,676686	0,542519
0,03 (3 %)	0,568123	0,419775	0,272667

Список літератури

1. Парфенцева Н.О., Голубова Г.В. (2023) Статистичні методи контролю якості як інструмент дослідження даних у пакеті Statistica. *Статистика України*, **100**, 19–26. DOI: [https://doi.org/10.31767/su.1\(100\)2023.01.02](https://doi.org/10.31767/su.1(100)2023.01.02)
2. Буданов П.Ф., Бойко Т.Г., Грінченко Г.С., Нечуйвігер О.П., Цихановська І.В. (2022) Застосування методів кваліметрії для оцінки комплексних показників якості багатопараметричних об'єктів. *Машинобудування*, **30**, 73–84. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-30-73-84>
3. Світлийшин І.І. (2023) Методичний підхід до оцінювання якості продукції. *Економіка, управління та адміністрування*, **1(103)**, 64–69. DOI: [https://doi.org/10.26642/ema-2023-1\(103\)-64-69](https://doi.org/10.26642/ema-2023-1(103)-64-69)
4. Корецька О.В. (2023) Використання статистичних методів в управлінні якістю продукції. *Проблеми сучасних трансформацій. Серія: економіка та управління*, **8**, 1–5. DOI: <https://doi.org/10.54929/2786-5738-2023-8-10-02>
5. Цибуленко В.О., Воронцов Б.С. (2023) Забезпечення контролю якості для традиційного і адитивного виробництва. *Матеріали науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта»*, 192–195. DOI: <https://doi.org/10.20535/2409-7160.2023.XXIII.278009>
6. Герасимов С.В., Грідина В.В. (2018) Методика обґрунтування номенклатури параметрів контролю радіотехнічних систем і призначення їх допустимих відхилень. *Системи обробки інформації*, **2(153)**, 159–164. DOI: <https://doi.org/10.30748/soi.2018.153.20>
7. ДСТУ ISO 2859-1:2001 *Статистичний контроль. Вибірковий контроль за альтернативною ознакою. Частина 1. Плани вибіркового контролю, визначені прийнятним рівнем якості для послідовного контролю партій* (ISO 2859-1:1999, IDT).
8. ДСТУ ISO 2859-5:2009 *Статистичний контроль. Вибірковий контроль за альтернативною ознакою. Частина 5. Система планів послідовного відбирання, індексованих межами прийняття якості (МПЯ) для послідовного вибіркового перевірення партій* (ISO 2859-5:2005, IDT).
9. ДСТУ ISO 2859-10:2009 *Статистичний контроль. Контроль за альтернативною ознакою вибіркової. Частина 10. Вступ до серії стандартів ISO 2859 щодо відбирання проб за альтернативною ознакою* (ISO 2859-10:2006, IDT).
10. Непран А.А., Воронкова А.А., Чуйко Н.В. (2023) Використання статистичних методів в управлінні якістю продукції. *Проблеми і перспективи розвитку підприємства*, **30**, 96–105. DOI: <https://doi.org/10.30977/PPV.2226-8820.2023.30.96>
11. Панкратова О.М. (2021) Підвищення кваліфікації персоналу в сучасних умовах та розвиток тенденцій корпоративних освітніх процесів. *Економіка та суспільство*, **25**, 1–6. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-25-7>

References

1. Parfentseva, N.O., Holubova, H.V. (2023) Statistical methods for quality control: A tool for data analysis in the statistica package. *Statystyka Ukrainy*, **100**, 19–26 [in Ukrainian]. DOI: [https://doi.org/10.31767/su.1\(100\)2023.01.02](https://doi.org/10.31767/su.1(100)2023.01.02)
2. Hrinchenko, H., Budanov, P., Boyko, T., Netchuyviter, O., Tsykhanovska, I. (2022) Application of qualimetry methods for evaluation of complex quality indicators of multiparameter objects. *Mashynobuduvannia*, **30**, 73–84 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-30-73-84>
3. Svitlyshyn, I.I. (2023) Methodological approach to product quality assessment. *Ekonomika, upravlinnia ta administruvannia*, **1(103)**, 64–69 [in Ukrainian]. DOI: [https://doi.org/10.26642/ema-2023-1\(103\)-64-69](https://doi.org/10.26642/ema-2023-1(103)-64-69)
4. Koretska, O. (2023) Using statistical methods of product quality management. *Problemy suchasnykh transformatsii. Seriya: ekonomika ta upravlinnia*, **8**, 1–5 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.54929/2786-5738-2023-8-10-02>
5. Tsybulenko, V.O., Vorontsov, B.S. (2023). Quality control for traditional and additive manufacturing. In: *Proceedings of the scientific and technical conference «Advanced engineering, technology and engineering education»*, 192–195 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.20535/2409-7160.2023.XXIII.278009>
6. Herasimov, S.V., Gridina, V.V. (2018) Method justification nomenclature control parameters of radio systems and purpose of their permissible deviations. *Systemy obrobky informatsii*, **2(153)**, 159–164 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.30748/soi.2018.153.20>
7. DSTU ISO 2859-1:2001. *Statistical control. Selective control by an alternative feature. Part 1: Sample control plans determined by the acceptance level of quality for sequential batch control* [in Ukrainian].
8. DSTU ISO 2859-5:2009. *Statistical control. Selective control by an alternative feature. Part 5. System of sequential sampling plans indexed by quality acceptance limits (QAL) for sequential sampling of batches* (ISO 2859-5:2005, IDT) [in Ukrainian].
9. DSTU ISO 2859-10:2009. *Statistical control. Selective control of an alternative characteristic. Part 10. Introduction to the ISO 2859 series of standards on sampling for alternative characteristics* (ISO 2859-10:2006, IDT) [in Ukrainian].
10. Nepran, A.A., Voronkova, A.A., Chuiko, N.V. (2023) Writing of statistical methods in managing product quality. *Problemy i perspektyvy rozvytku pidpriemnytstva*, **30**, 96–105 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.30977/PPV.2226-8820.2023.30.96>
11. Pankratova, O.M. (2021) Improvement of staff in modern conditions and development of trends in corporate educational processes. *Ekonomika ta suspilstvo*, **25**, 1–6 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-25-7>

APPLICATION OF SEQUENTIAL SAMPLING INSPECTION FOR QUALITY CONTROL OF MEASURING DEVICES AND SENSORS

M.M. Morozova

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.

E-mail: m.morozova@kpi.ua

This paper focuses on the implementation of sampling inspection based on the ISO 2859 series of standards. The provisions of these standards defining the methodology for lot quality assessment based on an attribute are analyzed, in particular ISO 2859-5:2005, which regulates sequential sampling plans. The key control parameters are determined, including the acceptance number, rejection number, and operating characteristic function. The research aims to adapt sampling inspection to the specifics of measuring and control devices and sensors, allowing for a reduction in inspection costs while improving decision-making efficiency. A mathematical model of sequential sampling inspection is presented, based on the binomial distribution, enabling an analytical assessment of the lot acceptance probability depending on the defect level and sample size. Calculations for various sample sizes and defect probabilities are performed, allowing for an evaluation of how control parameters affect the lot acceptance probability. As a case study, the inspection of thermistors with a specified nominal resistance tolerance is considered. It is established that increasing the sample size reduces the risk of defective items being accepted, while at an elevated defect level, the lot acceptance probability decreases significantly, demonstrating the effectiveness of sequential sampling inspection. Special attention is given to integrating sampling inspection into quality assurance processes, ensuring its rational application and adjustment based on production conditions. It is shown that the use of statistical inspection methods reduces the number of inspections without compromising quality assessment effectiveness. The necessity of considering production process specifics for the proper implementation of sampling inspection and ensuring its compliance with regulatory requirements is also emphasized. 11 Ref., 1 Tabl.

Keywords: sampling inspection plan, sequential sampling procedure, product quality control, measuring device, sensor

Отримано 27.03.25

Отримано у переглянутому вигляді 17.04.25

Прийнято 13.05.25

ПАМ'ЯТІ ПЕТЕРА ТРАМПУСА



Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики і редакція журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» з глибоким сумом повідомляють, що у віці 78 років відійшов у вічність професор Петер Трампус, президент Міжнародної Академії з неруйнівного контролю.

Його смерть глибоко переживають усі, хто мав честь працювати з ним. Непохитний професіоналізм професора Трампуса, його спокійна поведінка, вдумлива співпраця та вираженість у прийнятті рішень встановлюють стандарт, до якого ми всі прагнемо наблизитись.

Проф. Трампус був видатним і міжнародно визнаним авторитетом у неруйнівному контролі матеріалів. Він народився в Будапешті в 1947 р., закінчив Будапештський технологічний університет у 1972 р., отримавши ступінь інженера-механіка, а в 1979 р. отримав ступінь інженера з формування пластмас. Він отримав ступінь доктора технічних наук у 1985 р. і ступінь доктора наук Угорської академії наук (MTA) у 2008 р. Після навчання в університеті працював інженером-дослідником, а потім керівником лабораторії на сталеливарному заводі Cserel у Будапешті. У 1982 р. став начальником відділу атомної електростанції Paksі, а потім, з 1992 р., керівником апарату генерального директора. Як співробітник Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) продовжував допомагати роботі атомної електростанції Paksі у 1996–2003 рр. З його допомогою було доставлено основне обладнання Центру навчання технічного обслуговування для АЕС Paksі і була підготовлена угода з МАГАТЕ про підтримку першого продовження терміну експлуатації цієї атомної електростанції. Після роботи в МАГАТЕ П.Трампус був запрошеним дослідником в Інституті енергетики Об'єднаного науково-дослідного інституту Європейської комісії у 2003–2004 рр. У вересні 2009 р. його призначено професором університету рішенням Президента Республіки.

П. Трампус працював професором-дослідником в Університеті Дунауйварош (DUE) з 2011 р. У 2018 р. він отримав звання «Почесний професор» від DUE, став головою Технічного комітету з неруйнівного контролю Угорської академії наук (АТТВ) і Європейського товариства структурної цілісності (ESIS).

Він був професійним керівником та ініціатором численних масштабних дослідницьких проєктів, наприклад з випробування високоякісних конструкційних сталей (ТАМОР), розробки технології нових прокатних виробів з алюмінію (GINOP), а також видатним співробітником в Академії Paks II і Центру компетенції та досліджень Paks. Він провів інноваційну роботу, серед іншого у сферах перевірки безпеки корпусу реактора, інтегрованого підходу до управління життєвим циклом і кваліфікації систем неруйнівного контролю, а також брав активну участь у підвищенні ефективності АЕС Paks та продовження терміну її експлуатації.

До самої смерті Петер Трампус передавав свої знання молодому поколінню як професор інженерного факультету Університету Дебрецена та як професор-дослідник Університету Дунауйварош. Його наукові інтереси включали аналіз цілісності обладнання, що працює під тиском, і дослідження процесів пошкодження конструкційних матеріалів. Він був президентом Угорської асоціації неруйнівного контролю, членом ради директорів Європейської федерації неруйнівного контролю, делегатом від Угорщини у V комітеті Міжнародного інституту зварювання та членом-засновником Угорської академії інженерів.

Його професійна підтримка, наукова та просвітницька робота були відзначені кількома нагородами, серед яких – нагорода Габора Денеша у 2009 р.; Офіцерський хрест Угорського ордена заслуг цивільної категорії, який він отримав 20 серпня 2023 р. з нагоди свята засновника держави Святого Стефана; нагорода Геліюша, отримана у 2023 р.

Після його відходу залишилась професійна порожнеча, яку важко буде заповнити майбутнім поколінням!

Редколегія та редакція журналу
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль»

КОНФЕРЕНЦІЯ «НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ У ЗАЛІЗНИЧНІЙ ГАЛУЗІ–2025»

7 травня 2025 року відбулася науково-технічна конференція з неруйнівного контролю (НК) у залізничній галузі, організована Асоціацією «ОКО» (м. Київ). У заході взяли участь представники підприємств залізничного транспорту з різних регіонів України, Київського метрополітену та Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

Відкрила конференцію голова оргкомітету, генеральна директорка Асоціації «ОКО» **Тетяна Луценко**. Вона представила ключові досягнення очолюваної групи компаній, а також проекти, реалізовані на залізницях України та 77 інших країн світу, плани й перспективи діяльності Асоціації «ОКО».

Програма конференції включала наукові доповіді спеціалістів групи компаній Асоціації «ОКО»: ТОВ «Ультракон-Сервіс», ТОВ «Промприлад» і ПрАТ «УкрНДІНК» — з ультразвукових (УТ) і вихрострумівих (АТ) методів контролю залізничних рейок, а також контролю їх геометрії (ТГ). Обговорювалися також методи неруйнівного контролю, що застосовуються в обладнанні Асоціації «ОКО» для діагностики елементів рухомого складу в залізничній галузі: магнітопорошковий (МРТ), акустико-емісійний (АЕ), електромагнітно-акустичний (ЕМА), ультразвуковий (УТ) і вихрострумівий (АТ).

Тематика доповідей конференції охопила:

- рішення для контролю деталей та вузлів вагонів, локомотивів;
- рішення для НК залізничних рейок: ручні, механізовані, швидкісні;
- міжнародний досвід впровадження системи OKOSCAN 73HS (2024–2025 рр.);
- ризик-орієнтовану інженерію: багаторівневу модель НК залізничних рейок;
- можливості проведення НК у метрополітені: три види контролю рейкових колій в одній системі OKOSCAN 73HS — УТ, АТ, ГТ;
- презентацію механізованих дефектоскопів для ультразвукового контролю рейок;
- перспективи та особливості вихрострумівого контролю рейкових колій;
- презентацію механізованих дефектоскопів для вихрострумівого контролю;
- питання підготовки кваліфікованих кадрів.

Доповідачі представили новітні розробки, що будуть сприяти підвищенню рівня безпеки та ефективності залізничних перевезень. Серед новинок були механізовані дефектоскопи для ультразвуково-

вого та вихрострумівого контролю рейок, швидкісні автоматизовані системи. Також було представлено стаціонарні системи для акустико-емісійного та вібродіагностичного контролю елементів рухомого складу. Найбільший інтерес в учасників конференції викликала швидкісна система, встановлена на базі локомотива, що є економічним рішенням для контролю одразу двох рейок колії.

Денис Галаненко, к.т.н., провідний технолог ПрАТ «УкрНДІНК», спеціаліст III рівня УТ та АТ, виступив з доповіддю «**Комплексна система контролю та моніторингу залізничних колій: підвищення безпеки та ефективності за допомогою ризик-орієнтованої інженерії (RBE)**». Доповідач наголосив, що метою ризик-орієнтованої інженерії є систематичне виявлення, аналіз та усунення потенційних загроз. Саме тому НК на залізницях і в метрополітенах має бути поетапним та обов'язково тривірневим. Починати необхідно з ультразвукового швидкісного контролю із застосуванням автоматизованих систем та спеціально обладнаних вагонів. Потім рейки в місцях виявлених дефектів слід локально обстежити механізованим дефектоскопом, а при необхідності додатково вивчити за допомогою портативних дефектоскопів. Такий підхід дає змогу ефективно керувати ризиками та зменшити ймовірність аварій.

Володимир Міщенко, керівник відділу НК ТОВ «Ультракон-Сервіс», спеціаліст III рівня УТ, виступив з доповіддю «**Впровадження сучасних комплексних засобів діагностики в залізничну інфраструктуру**». Доповідач презентував проекти, реалізовані Асоціацією «ОКО» на залізницях Туреччини, Італії, Індії та США, а також в метрополітенах Сингапуру й Бразилії. Обладнання було розроблено індивідуально, відповідно до технічного завдання замовника, і адаптувалося до національних стандартів. Кожен проект супроводжувався пусконаладжувальними роботами, навчанням персоналу та технічною підтримкою. Усі впроваджені системи підтвердили високу ефективність контролю залізничної колії відповідно до національних регламентів.

Анастасія Паренюк, технологія ТОВ «Промприлад», у своїй доповіді «**Швидкісна система комплексної діагностики рейкової колії OKOSCAN 73HS на базі автомобіля на комбінованому ході**» представила структурну схему системи OKOSCAN 73HS УТ+ТГ, призначеної для швидкісного ультразвукового контролю рейок і



Виступає голова оргкомітету конференції, генеральна директорка Асоціації «ОКО» Тетяна Луценко

контролю їх геометрії. Також доповідка ознайомила учасників конференції із функціональними характеристиками системи, варіантами дизайну кунга автомобіля, роботою роботизованої підвіски ультразвукового колеса. Ключовою перевагою системи OKOSCAN 73HS UT+TG зазначено універсальність її конструкції, що дозволяє застосування як під вагоном, так і з автотрисою або автомобілем на комбінованому ході.

Олександр Івко, технолог ТОВ «Промприлад», виступив з доповіддю «Актуальні рішення для мобільного ультразвукового контролю рейок в колії від вітчизняного розробника».



Доповідає Володимир Міщенко, керівник відділу НК ТОВ «Ультракон-Сервіс»



Доповідає Анастасія Паренюк, технолог «Промприлад»



Доповідає Денис Галаненко, провідний технолог ПрАТ «УкрНДІНК»

Доповідач представив одно- та дворейкові дефектоскопи з ковзним блоком ультразвукових перетворювачів, що дозволяють прозвучувати шийку, голівку та підшву рейки під різними кутами, а тому забезпечують контроль усіх критичних зон профілю рейки, окрім пір'їв підшви. Однією з модифікацій таких перетворювачів є іммерсійний блок у формі колеса, яке забезпечує стабільний акустичний контакт між датчиком і рейкою.

Ілля Кириленко, технолог ТОВ «Ультракон-Сервіс» у своїй доповіді «Перспективні засоби вихрострумового контролю рейок з метою оптимізації витрат на утримання колії» презентує



Доповідає Олександр Івко, технолог ТОВ «Промприлад»



Доповідає Ілля Кириленко, технолог ТОВ «Ультракон-Сервіс»

тував вихрострумові дефектоскопи, що застосовуються для виявлення поверхневих тріщин у загартованих рейках та визначення глибини їх залягання. Завдяки блоку вихрострумових перетворювачів дефектоскоп забезпечує повноцінний контроль робочої поверхні рейки за один прохід, з мінімальним зазором між перетворювачем та рейкою (від 1 мм).

На конференції виступив **Юрій Посипайко**, провідний інженер Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, спеціаліст III рівня з візуального (VT) та капілярного (PT) методів контролю. Він наголосив на необхідності підготовки дефектоскопістів виключно в центрах, оснащених необхідними навчальними та атестаційними зразками, такими як навчальний центр «Ультракон-Сервіс» та Орган із сертифікації персоналу у галузі НК на базі ПрАТ «УкрНДІНК». Адже формальний підхід до видачі сертифікатів, який наразі поширюється Україною іншими центрами, загрожує втратою якості проведеного дефектоскопістом контролю.



Виступає Юрій Посипайко, провідний інженер Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

Олександр Зельніченко, директор Міжнародної Асоціації «Зварювання» (видавець журналів «Автоматичне зварювання» і «Технічна діагностика та неруйнівний контроль»), у своєму виступі подякував за конференцію та побажав усім успіхів, підкресливши важливість проведення таких фахових заходів для розвитку галузі неруйнівного контролю.

У рамках конференції відбулася виставка обладнання для НК виробничих підприємств Асоціації «ОКО» – ТОВ «Ультракон-Сервіс» і ТОВ «Промприлад». У виставковому залі також тривало неформальне спілкування учасників Конференції та виставки, під час якого обговорювалися актуальні інновації в галузі НК



Презентація однорейкових дефектоскопів у виставковому залі OKOndt GROUP



Презентація дворейкового дефектоскопа у виставковому залі Асоціації «ОКО»



Учасники конференції біля системи OKOSCAN 73HS, інтегрованої з локомотивом

рухомого складу, рейкових колій залізниці та метрополітену.

Організаційний комітет конференції «Неруйнівний контроль у залізничній галузі–2025» висловив щирю вдячність усім учасникам та закликав до збереження традиції регулярного проведення подібних заходів.

Тетяна Луценко, Асоціація «ОКО»

СЕМІНАР «НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ТА МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ»

28 травня 2025 р. у м. Києві в Міжнародному виставковому центрі під час роботи XXIII Міжнародного промислового форуму було проведено науково-практичний семінар «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану». Організатори семінару – ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України та Міжнародна Асоціація «Зварювання». Семінар викликав зацікавленість серед учасників та відвідувачів виставки. У роботі семінару взяли участь більше сорока фахівців з промислових підприємств, закладів вищої освіти та інститутів НАН України. На семінарі було проголошено десять доповідей.

Велику зацікавленість викликали доповіді О.В. Павлія, директора компанії ТОВ «НВФ «Діагностичні прилади». У доповіді «Приклад застосування системи GO-SCAN для дефектоскопії зварювання трубопровода» було наведено технічні характеристики, області застосування та приклади використання портативного приладу для неруйнівного контролю GO-SCAN, який працює за методом прямої цифрової радіографії. Відбиток рентгеновського випромінювання фіксується безпосередньо на цифровому детекторі (фотоприймачі). Цифрова обробка дозволяє отримати високороздільні зображення. Зображення доступні миттєво після зйомки. Менше доза випромінювання порівняно з плівковою радіографією. Система застосовується в промисловості (для виявлення дефектів у металевих конструкціях, зварних з'єднаннях).

У доповіді «Радіаційні методи неруйнівного контролю. Класична радіографія. Сучасний стан та перспективи» О.В. Павлій розповів про перспективи та розвиток радіаційних методів неруйнівного контролю, що залишаються важливим елементом системи управління якістю продукції та діагностики обладнання в експлуатації. Удосконалення методу сьогодні визначається розвитком

двох найважливіших складових технології радіаційного контролю: 1. Покращення та оптимізація джерел іонізуючого випромінювання (зменшення розмірів фокальної плями, габаритів, ваги). 2. Застосування передових технологій у створенні нових можливостей детектування випромінювання після взаємодії з об'єктом контролю (збільшення чутливості до випромінювання, роздільної здатності, функціональне різноманіття). Також провідні виробники працюють над зменшенням розмірів генераторів (наприклад, Teledyn-ICM – зменшення розмірів та ваги, розвиток батарейної серії генераторів). Також удосконалюється технологія прямої радіографії (поява гнучких детекторів, зменшення розміру пікселя) тощо.

А. Паренюк, технолог ПрАТ «УкрНДІНК» у доповіді «Швидкісна система комплексної діагностики рейкової колії OKOSCAN-73 HS» розповіла про високошвидкісну систему OKOSCAN-73HS, призначену для проведення швидкісного етапу ультразвукового контролю рейок. Такі системи можуть виконуватися на базі залізничних вагонів і транспортних засобів (автомобілів на комбінованому ході). Система здатна проводити контроль на швидкості до 60 км/год завдяки використанню імерсійних коліс. Загальна кількість перетворювачів 24 – по 12 на кожен рейку. Для проведення якісної і ефективної перевірки застосовуються перетворювачі з кутами введення 0° , 70° та 45° , а для виявлення вертикальних тріщин у бокових гранях головки використовується бокова схема прозвучування з кутом 50° . Роботизована підвіска ультразвукових коліс із трьома ступенями свободи дозволяє максимально точно позиціонувати колесо на рейці, що дає змогу проводити високоточний контроль навіть у складних умовах. Система також оснащена навігаційною системою GNSS,



Під час проведення семінару. Виступає А. Паренюк, ПрАТ «УкрНДІНК»



Виступає О.В. Павлій, ТОВ «НВФ «Діагностичні прилади»

а результати виводяться у форматах А- та В-сканів. Завдяки високій ефективності та здатності оперативно охоплювати великі території, система OKOSCAN-73HS є надзвичайно цінним інструментом для своєчасного виявлення потенційних загроз і порушень, що дозволяє швидко реагувати та запобігати розвитку критичних ситуацій.

В.М. Тороп, завідувач відділу ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, у своїй доповіді «Оцінка ризиків крихкого руйнування конструкційної сталі М16С та зварних з'єднань головних повздовжніх балок мосту Патона» розглянув питання визначення опору крихкому руйнуванню сталі М16С та її зварних з'єднань головних повздовжніх балок під час оцінки технічного стану та обґрунтування продовження подальшої безпечної експлуатації мосту ім. Є.О. Патона через річку Дніпро в м. Києві та запропонував підходи до оцінки ризиків крихкого руйнування повздовжніх балок мосту та до визначення характеристик в'язкості руйнування конструкційних сталей у випадку обмежених даних щодо ударної в'язкості, отриманих на зразках Менаже та Шарпі.

М.М. Карманов, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, у доповіді «Прецизійні рентгенівські сканери на основі міні-сенсорів. Цифрові системи рентгенотелевізійного неруйнівного контролю» пропонує нові підходи в цифровій радіографії з використанням недорогих високочутливих твердотільних рентгенівських міні-сенсорів S10811-11 японської фірми Hamamatsu Photonics. Отримані окремі фрагменти цифрових рентгенівських зображень зберігаються в пам'яті комп'ютера і потім об'єднуються програмним способом в єдине цифрове зображення. Була створена рентгенівська система однопрохідного сканування. Для компенсації неточності позиціонування міні-сенсора пропонується використовувати програмні кореляційні методи обробки зображення. Для підвищення якості цифрового зшивання розроблено програмне забезпечення для представлення зображень в одному контрасті. Також пропонуються нові принципи побудови цифрових систем радіаційного контролю, що забезпечують мінімізацію їх вартості та збереження широкого набору функціональних можливостей відповідно до вимог замовника на основі цифрових детекторів РТВ-4, РТВ-3, РТВ-5.

Д.І. Стельмах, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, у доповіді «Smart-діагностика великогабаритних конструкцій з допомогою безпілотних літальних апаратів, методу фотограмметрії та штучного інтелекту» доповів про Smart-діагностику – інтегрований підхід, який передбачає використання БПЛА, фотограмметрії та штучного інтелекту для дистанційного моніторингу технічного стану великогабаритних інженерних конструкцій. Мето-

дика передбачає виконання аерофотозйомки з використанням БПЛА, побудову тривимірної моделі об'єкта у програмному забезпеченні 3DF Zephyr та подальшу обробку даних із застосуванням алгоритмів комп'ютерного зору. Фотограмметричний аналіз дозволяє виявляти порушення геометрії та визначати просторові параметри конструкційних елементів та дефектних зон. Обробка знімків за допомогою глибоких нейронних мереж автоматизує процес виявлення пошкоджень і значно прискорює обробку великої кількості даних. Практична реалізація концепції Smart-діагностики була успішно апробована під час обстеження Київської телевежі, що пошкоджена внаслідок ракетного удару рф 1 березня 2022 р.

О.П. Шуткевич, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, у доповіді «Адаптація методу широгографії для виявлення мікрodefektів в алюмінієвих зварних з'єднаннях та тонкостінних композитах» розповів про широгографічний прилад на основі модифікованого інтерферометра Майкельсона. Розроблене обладнання використовувалося для виявлення внутрішніх надмалих дефектів у плоских зварних алюмінієвих та композитних зразках. Дефекти у вигляді некрізних отворів вводилися як в зоні зварного шва алюмінієвих зразків, так і в ділянках основного матеріалу. Розмір дефектів становив 0,3...1 мм у діаметрі для алюмінієвих і 0,8...2 мм для композитних зразків з різною глибиною залягання. Отримані широгографічні зображення підтверджують ефективність удосконаленого широгографічного інтерферометра та автоматизованої системи термічного навантаження зі спеціалізованим програмним забезпеченням для ефективного виявлення підповерхневих дефектів діаметром від 0,3 мм на різній глибині, маючи односторонній доступ.

В.В. Савицький, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, у доповіді «Автоматизація широгографічного контролю якості матеріалів за допомогою штучного інтелекту та синтетично згенерованих даних» розповів про використання методу широгографії для ефективного застосування при обстеженні об'єктів складної форми та нейронної мережі для автоматичного пошуку дефектів на зображеннях. Запропонована методика навчання на синтетичних широгограмах забезпечила високий рівень точності сегментації дефектів і стабільність моделі під час узагальнення на реальні дані, що дозволяє зменшити залежність від експериментальних зразків. Використання синтетичних даних як альтернативи реальним широгограмам прискорює процес навчання моделі, що робить метод більш доступним та ефективним.

С.М. Глабець, фахівець ТОВ «НВФ «Діагностичні прилади», у своїй доповіді «Ультразвуковий



Виступає Д.І. Стельмах, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

контроль стикових зварних з'єднань поліетиленових труб» наголосив, що при транспортуванні різноманітних рідин сталеві труби мають обмежений термін використання з-за старіння металу, корозії, накопичення забруднень тощо. Використання поліетиленових труб високої щільності (ПВЩ) є альтернативою металевим, що дозволяє подолати вказані недоліки. Досліджувалося застосування класичних методів контролю якості зварних з'єднань сталевих труб до труб з ПВЩ, зокрема ультразвукового. Розглянуто різновид УЗК – дифракційно-часовий метод (ДЧМ), що широко використовується в останні роки. Зроблено висновок, що ДЧМ є безпечнішою та ефективнішою альтернативою радіографії та класичному УЗК. Метод потенційно може бути основним методом контролю зварних з'єднань труб з ПВЩ за умови адаптації обладнання та методики контролю до особливостей матеріалу.

Ю.М. Посипайко, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, у доповіді «Нові стандарти дефектоскопії металопродукції методами проникаючих ре-



Виступає С.М. Глабець, ТОВ «НВФ «Діагностичні прилади» човин» приділив основну увагу процесу гармонізації стандартів Європейського Союзу в галузі неруйнівного контролю якості металопродукції. Ці стандарти, у більшості випадків, були підготовлені Технічним комітетом CEN/TC 138 «Неруйнівний контроль», секретаріат якого веде AFNOR, у співпраці з технічним комітетом ISO/EC 135 «Неруйнівний контроль». На сьогодні в Україні діють як ДСТУ практично всі стандарти в галузі неруйнівного контролю, що охоплюють всі види та методи випробувань.

Семінар пройшов у плідній і дружній атмосфері. Доповіді викликали науковий і практичний інтерес у присутніх – представників науки, освіти та виробництва, які ставили багато питань до доповідачів. Організатори семінару висловили вдячність усім доповідачам і учасникам та висловили побажання, щоб подібні заходи стали постійними.

Зі збіркою тез семінару можна ознайомитись за посиланням: <https://patonpublishinghouse.com/proceedings/3D-NDT2025.pdf>

Відповідальний секретар журналу ТДНК,
Ірина Романова

Ефективність сонячних панелей поліпшена за допомогою спеціальних молекул

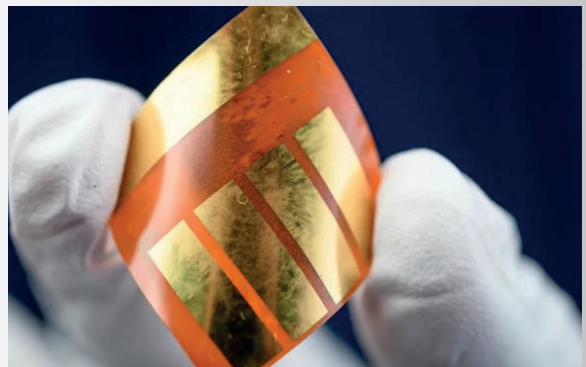
Дослідники з Інституту Гельмгольца (HI ERN) з відновлюваної енергії в філії дослідницького центру Jülich виявили нові органічні молекули, які можна використовувати для підвищення ефективності перовскітних сонячних елементів.

Вчені об'єднали можливості штучного інтелекту (ШІ) з повністю автоматизованим високопродуктивним синтезом.

Відправною точкою в HI ERN була база даних зі структурними формулами близько мільйона віртуальних молекул, які можна було б отримати з комерційно доступних речовин.

Дослідники використовували усталені квантово-механічні методи для розрахунку енергетичних рівнів, полярності, геометрії та інших характеристик 13000 випадково обраних віртуальних молекул.

Молекули, запропоновані ШІ, можуть бути використані для створення сонячних батарей з ефективністю вище середньої.



За матеріалами Інтернету



**НОВИНИ УКРАЇНСЬКОГО ТОВАРИСТВА
НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ**
член Європейської федерації з неруйнівного контролю
член Міжнародного комітету з неруйнівного контролю



Підтвердили членство в УТ НКТД на новий термін

- **Владіміров Сергій Альбертович**
директор ТОВ «Науково-технічний центр «Січ Серт», м. Запоріжжя
- **Глушкова Діана Борисівна**
д.т.н., професор, завідувачка кафедри технології металів та матеріалознавства Харківського національного автомобільно-дорожнього університету
- **Городжа Анатолій Дмитрович**
к.т.н., професор Київського національного університету будівництва та архітектури
- **Єременко Володимир Станіславович**
д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

- **Мокійчук Валентин Михайлович**
к.т.н., доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- **Рижков Юрій Володимирович**
к.т.н., доцент кафедри технології металів та матеріалознавства Харківського національного автомобільно-дорожнього університету
- **Трощинський Богдан Олександрович**
к.т.н., доцент Київського національного університету будівництва та архітектури
- **Щербань Анастасія Павлівна**
к.т.н., доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Технології та засоби для НК

ДЕФЕКТОСКОПІЯ У ВОЄННИЙ ЧАС

Троїцький В.О., д.т.н., проф.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

У воєнний час при великих об'ємах руйнування перед початком ремонтних робіт доцільним є застосування спрощених, полегшених у реалізації методів неруйнівного контролю (НК). Наприклад, рентгентелевізійний контроль замість плівкової радіографії, ультразвуковий контроль (УЗК) на зниженій чутливості і т.п.

Бездефектних зварних швів не існує. Мову можна вести тільки про рівень допустимості окремих типів дефектів та їх вплив на внутрішні напруження, які руйнують конструкції. В ЕС введено три рівні якості: В, С, D, що визначають рівень відповідальності та які впливають на вартість виготовлення конструкції. Усі види сучасних технологій потребують відповідного рівня технічної культури, кваліфікації спеціалістів, знань про можливості окремих методів контролю якості.

Якщо уважно вивчити діаграму походження аварій трубопроводів (рис. 1), які дуже ретельно діагностуються під час виготовлення

та не менш ретельно моніторяться протягом всього терміну їх експлуатації, то стає зрозумілим, що головна причина їх відмов – людський фактор, через який відбувається при-



Рис. 1. Основні причини відмови трубопроводів

близно 50 % усіх аварій. Тому від технічної компетентності дефектоскопістів залежить можливість пропуску небезпечних дефектів. Людський фактор може бути зменшений за рахунок спрощення процесу НК. Неможливо запобігти випадковому впливу на дефектоскопічні процеси зовнішніх факторів (погода, якість електроенергії), до яких дуже чутливі всі методи дефектоскопії. Через стихійні лиха, вибухи, природні явища відбуваються тільки приблизно 7 % аварій. Однак у воєнний час цей відсоток значно збільшується.

Для проведення моніторингу промислових і цивільних об'єктів розроблено багато спеціфічних методик, які повністю описано в книзі «Моніторинг стану металоконструкцій», Київ, 2020, 300 с.

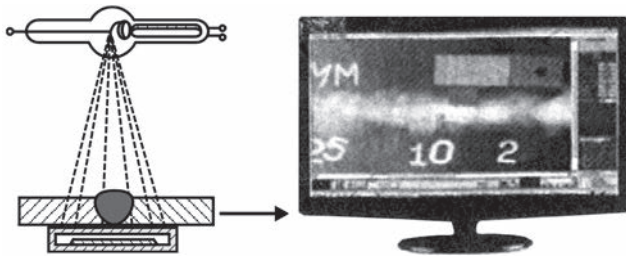


Рис. 2. Схема флеш-вимірювального рентгенотелебачення за ДСТУ ISO 17636-2 (радіоскопія)

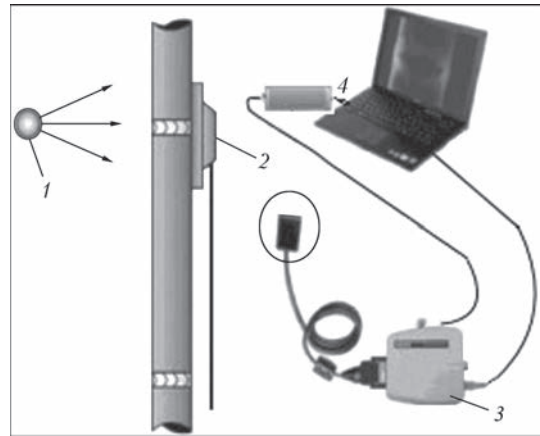


Рис. 3. Контроль стикових з'єднань арматури і труб малого діаметру: 1 – джерело випромінювання; 2 – мініатюрний твердотільний перетворювач; 3 – блок передачі зображень; 4 – виведення зображень на монітор

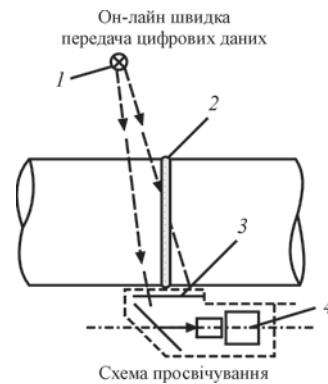


Рис. 4. Вартість і швидкість РТК із застосуванням цифрових РТК-детекторів ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ на порядок нижча за радіографію на плівку

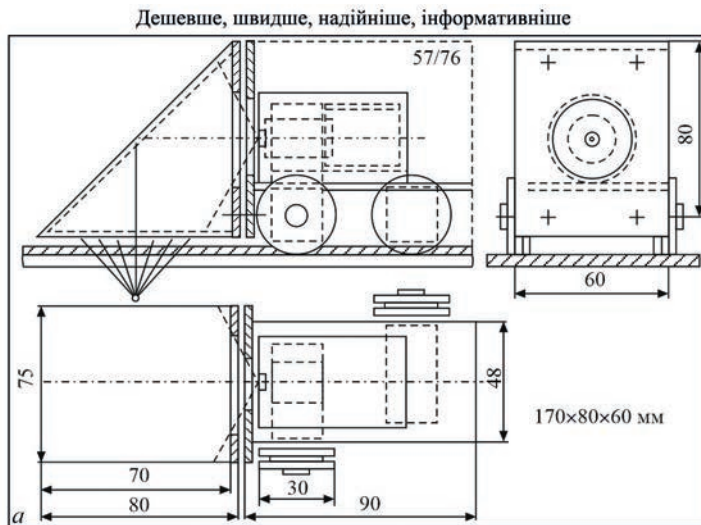


Рис. 5. Дистанційно керований радіоскопічний детектор: а – креслення з розмірами приладу; б – перетворювач на об'єкті; в – зварний шов (цифрове фото); г – цифровий рентгенівський знімок

Інформацію про низьковартісні та полегшені для застосування у воєнний час методи НК наведено нижче.

Рухомий рентгенотелевізійний контроль (ISO 17636-2). Це – миттєва цифрова обробка зображень, низька вартість, нові можливості для оперативної дефектоскопії. Зараз численні побутові комунікації майже не перевіряються рентгенівським просвічуванням, тому що вартість плівкової радіографії дуже висока. Впровадження засобів портативного рентгенотелевізійного контролю (РТК) дозволило збільшити об’єми контролю якості в промисловості. Значно дешевший РТК поступово витісняє плівкову радіографію, забезпечує контроль у реальному часі та в кілька разів знижує вартість моніторингу. У воєнний час безплівковий РТК застосовують для опе-

ративної оцінки заповнення снарядів вибуховими речовинами, оцінки якості стволів, бронепластин та ін. На рис. 2, 3 наведено схему технології РТК арматури газових труб на основі твердотільних детекторів, що застосовуються в стоматології.

Це – найшвидший та найдешевший спосіб миттєвого отримання цифрового рентгенівського зображення в електронному вигляді, який не потребує додаткового обладнання для хімічної обробки й зчитування, а також додаткового часу на виконання допоміжних операцій, підбору режимів просвічування. ІЕЗ ім. Є.О. Патона виробляє такі цифрові перетворювачі (рис. 4, 5). Після комп’ютерної обробки цифрових зображень вони дають можливість отримати чутливість до 0,1 % і краще вивчити об’єкт. Портативні, у кілька квадратних

Таблиця 1. Порівняння технологій скануючого магнітопорошкового контролю і традиційних методів МПК

Традиційна (без сканування)	Нова (зі скануванням)
Продуктивність	
Мас виконуватися трикратна перестановка намагнічуючого пристрою в одній точці та багаторазові вздовж зварного шва	Різностропане плавне переміщення по поверхні та виявлення тріщин різної орієнтації без відриву намагнічуючого пристрою від об’єкта
Мобільність	
При кожній перестановці намагнічуючого пристрою потрібно докласти зусилля 20...30 кг/с	Контроль об’єктів без відриву намагнічуючого пристрою від поверхні об’єкта
Швидкість	
Низька, визначається кількістю перестановок і процедур МПК	Висока, процедура МПК виконується у русі



Рис. 6. Скануючі пристрої ІЕЗ ім. Є.О. Патона для магнітопорошкового контролю

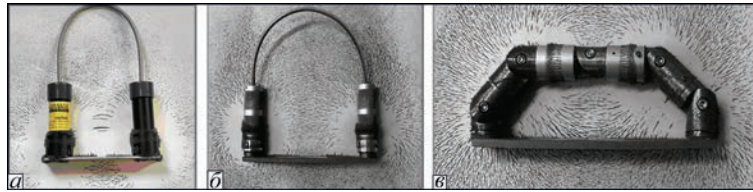


Рис. 7.

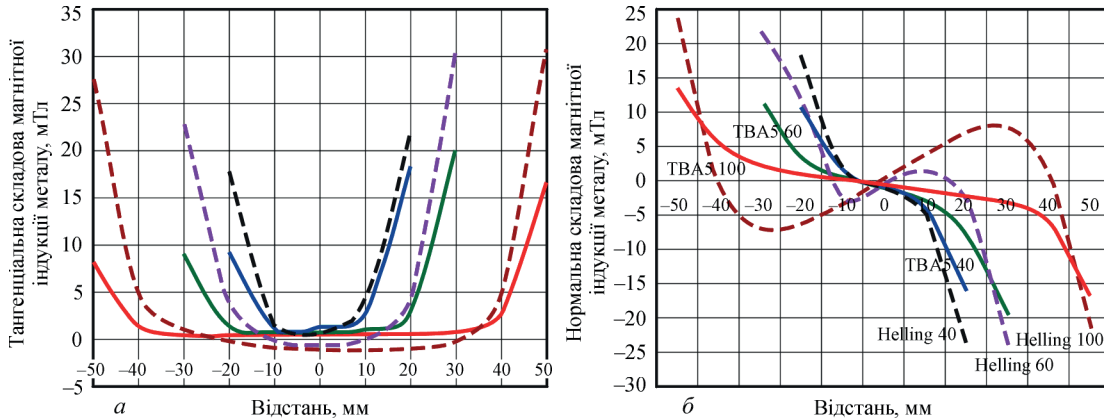


Рис. 8. Розподіл B_n , B_t складових магнітної індукції на сталій пластині: а – тангенційної B_t ; б – нормальної B_n при відстані 40, 50 та 100 мм між полюсами (----) тросик, ярмо зі сталі (—)

сантиметрів, твердотільні цифрові електронні перетворювачі без обмежень можуть програмно пересуватися по поверхні об’єкта будь-яких розмірів.

Технологія скануючого магнітопорошкового контролю (МПК). Нова технологія скануючого магнітопорошкового контролю в табл. 1 порівнюється з традиційними методами МПК.

Можливості чотирьох намагнічувальних пристроїв (рис. 6–8) визначаються розподілом нормальних складових поля B_n , які у випадку використання тросиків мають чотири мертві зони (рис. 8, б). Ці зони поганого виявлення дефектів знаходяться під полюсами в місцях та у точках 1/4 та 3/4 у міжполюсній відстані, де криві розподілу нормальної складової B_n проходять через максимальні значення. Чим відстань між полюсами більша, тим сильнішим є прояв мертвих зон. Намагнічуючі пристрої з тросиками випускаються в Україні, Німеччині та в інших країнах. Це дискредитує магнітопорошковий метод НК. На рис. 8 показано розподіл складових магнітної індукції поверхні.

Візуально-вимірювальний контроль (ВВК). До початку ВВК оператор повинен ознайомитися з нормативною документацією (ДСТУ ISO 5817) та рівнем якості, який повинен бути. За стандартом України дефекти зварювання плавленням можуть бути трьох рівнів D, C, B. Якщо труба не відповідає жлданому з рівнів якості, вона може бути викорис-

стана тільки для трубних металоконструкцій. Виробництво труб різного рівня якості потребує відповідного рівня технічного оснащення та підготовки персоналу.

У сучасному виробництві зварних конструкцій зображення внутрішніх і зовнішніх зварних з’єднань записуються оптоелектронними приладами, які виробляються в ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Рівні допустимих дефектів визначають вартість металоконструкцій.

Ручні та дистанційно-керовані пристрої для об’єктивного візуально-вимірювального контролю. При моніторингу металоконструкцій важливим є об’єктивний візуально-вимірювальний контроль, наприклад, як у табл. 2 для нафтохімічних виробництв. Зображений на рис. 9 ВВК/ТВА-1 складається з: 1а, 1б – світло-лазерне підсвічування шва та пришовної зони; 2а, 2б, 2в – гвинти для регулювання ширини та висоти світлового підсвічування; 3 – відеокамера з підсвічуванням; 4 –

Таблиця 2. Візуально-вимірювальний контроль для нафтохімічних виробництв

Об’єкт	Об’єкт контролю	Збільшення
Ковані, штамповані	100 % поверхні	10-кратне
Кромки швів	100 % поверхні, включаючи пришовну зону завширшки 30 мм	
Несплавлення	100 % поверхні	3...4-кратне
Зварні з’єднання	Поверхні з пришовною зоною завширшки не менше 30 мм	

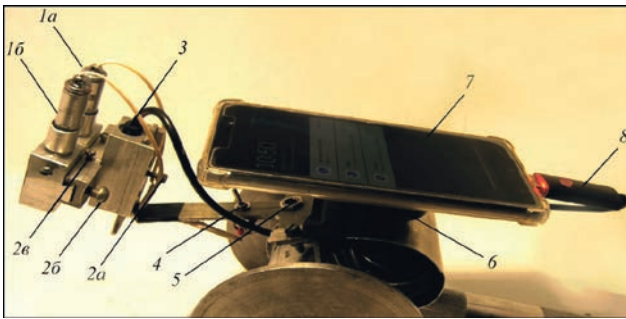


Рис. 9. Ручний пристрій ВВК/ТВА-1

ввімкнення світло-лазерного підсвічування; 5 – роз'єм для заряджання акумулятора; 6 – магнітний утримувач для смартфона; 7, 8 – роз'єм USB/microUSB; (Патент України № 133382).

При зборі даних відеокамера знаходиться від поверхні шва на відстані 5...8 см, при цьому зображення має дворазове збільшення при швидкості переміщення 3 м/хв відеопотоку до 30 кадрів/с; зовнішній діаметр головки камери 8 мм, дроти 4 мм; фокусна відстань від 25 мм; кут огляду 67°; інтерфейс USB/microUSB; підтримка системи Android. Виготовляють також радіокеровані багатофункціональні платформи, здатні переміщатися в різних просторових положеннях, включно зі стельовим.

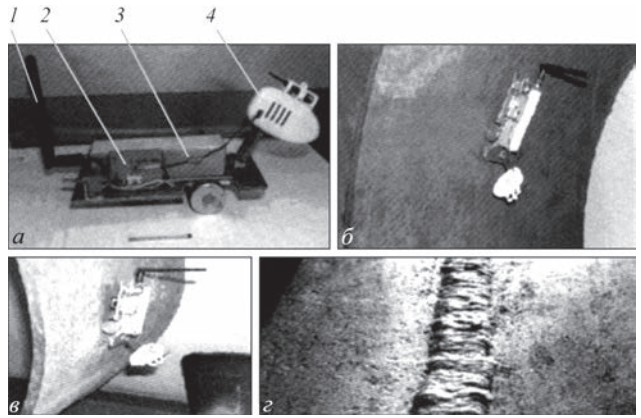


Рис. 10. Універсальна дефектоскопічна платформа

На рис. 10 показана така платформа з WiFi-камерою на зовнішній і внутрішній поверхнях труби. Вона має лише два колеса, осі яких рознесені, що робить її стійкою на поверхнях будь-якої кривизни та забезпечує розгортання на місці 360°. Сила відриву пристрою від поверхні 12 кг (Патент України № 143653): а – загальний вигляд; б, в – стельове та бічне положення на трубі діаметром 1200 мм; г – запис зварного шва; 1 – антена 2,4 ГГц; 2 – блок радіокерування; 3 – акумулятор; 4 – відеокамера.

Сторінки історії УТ НКТД

Продовжуємо гортати сторінки Інформаційного бюлетеня УТ НКТД «НК-Інформ». На черзі – звіти про визначні події в громадському житті дефектоскопічної спільноти України в 2006 році (збережено авторські тексти з незначними скороченнями).

Рік 2006

11-та Міжнародна науково-технічна конференція «ЛЕОТЕСТ-2006» у Славську

Традиційно в лютому спеціалісти з неруйнівного контролю збираються в засніжених Карпатах у відомому гірськолижному центрі Славське Львівської області. Цього року чергова Міжнародна науково-технічна конференція «ЛЕОТЕСТ-2006. Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів» проходила з 13 по 18 лютого.

Організаторами цієї щорічної конференції виступили Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діа-

гностики (УТ НКТД); Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України (ФМІ), м. Львів; Івано-Франківський національний університет нафти та газу (ІФНУНГ); НВФ «Ультракон-Сервіс», м. Київ; НВФ «Спеціальні Наукові Розробки», м. Харків і Центр «Леотест-Медіум», м. Львів (організаційне бюро конференції).

Відкрив конференцію вступним словом голова Оргкомітету, член Правління і голова Західного відділення УТ НКТД, директор Центру «Леотест-Медіум» к.т.н. В.М. Уча-



нін. З доповідями виступили фахівці ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАНУ (м. Львів), ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (м. Київ), Івано-Франківського національного університету нафти та газу, Інституту сцинтиляційних матеріалів (м. Харків) Кіровоградського державного технічного університету, Національного університету «Львівська політехніка», Національного авіаційного університету (м. Київ), НВФ «Ультракон-Сервіс» (м. Київ).

На засіданні «круглого столу» з проблем неруйнівного контролю присутніх зацікавили неформальні виступи керівників підрозділів НК низки провідних підприємств України. Вони зробили повідомлення про досвід застосування методів НК на їхніх підприємствах, розповіли про невирішені проблеми підприємств і запропонували учасникам взяти участь у їх вирішенні.

В холі конференц-зали проходила виставка засобів неруйнівного контролю та

5-та Національна науково-технічна конференція та виставка «Неруйнівний контроль та технічна діагностика»

У черговий раз у столицю України – сонячне місто Київ – на 5-ту Національну науково-технічну конференцію та виставку «Неруйнівний контроль та технічна діагностика» з'їхалися фахівці з неруйнівного контролю, щоб поділитися своїми досягненнями та обговорити проблемні питання у галузі НК та ТД.

Конференцію було організовано Українським товариством НКТД спільно з Національною академією наук України, Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Держспоживстандартом України, Держгірпромнаглядом МНС України,

технічної діагностики. У ній брали участь: НВФ «Ультракон-Сервіс» та НВФ «Промприлад» (м. Київ), НВФ «Інтрон-СЕТ» (м. Донецьк), Компанія «Сперанца» (м. Жовті Води), Центр «Леотест-Медіум» (м. Львів).

Конференція пройшла в діловій та доброзичливій атмосфері. Під час роботи секцій учасники конференцій мали досить часу для питань і плідних дискусій, які тривали й у вільний час. Проживали учасники конференції у пансіонаті «Бойківщина», розташованому на околиці Славська в оточенні багаторічних сосен, ялин і смерек, поблизу гірськолижних трас. Частина дня її учасники могли присвятити відпочинку на гірських лижах на схилах гір Тростян, Кремінь, Погар, Писана.

Ю.М. Посипайко, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ,
В.М. Учанін, ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАНУ

ДК «Укртрансгаз» НАК «Нафтогаз України». Генеральний спонсор конференції – Асоціація «ОКО», що об'єднує компанії «Ультракон-Сервіс», «Промприлад» та «УкрНДІНК».

Конференція проходила з 10 до 14 квітня 2006 р. в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (пленарні засідання) та у Виставковому центрі «КиївЕкспоПлаза» (засідання наукових секцій).

У конференції взяли участь понад 400 фахівців із приблизно 190 організацій та підприємств, у т.ч. таких відомих, як ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Національний технічний



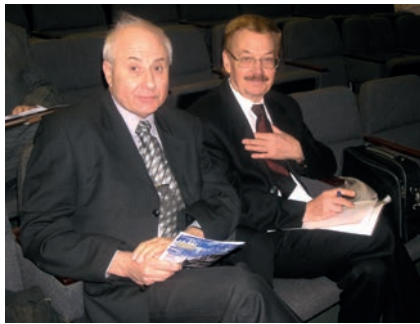
О.В. Мозговой, В.О. Троїцький, О.М. Карпаш



В.М. Учанін, Ю.К. Бондаренко



В.А. Куліш, Е.С. Крилов



І.А. Заплотинський, В.О. Цечаль



В.М. Учанін, В.Г. Рибачук



Г.Г. Луценко, Т.М. Луценко



І.В. Павлій, О.М. Козін



Н.П. Разиграєв, В.М. Пекер

університет України «Київський політехнічний інститут», Івано-Франківський національний технічний університет нафти та газу, Дніпропетровський національний університет, УкрНДІпроект (м. Київ), та з багатьох інших організацій і підприємств.

Я згадую конференції, що проводились у 50-х роках минулого століття, коли дефектоскопія в галузі зварювання в Україні робила свої перші кроки. І треба віддати належне Україні – незважаючи на всі складнощі та перепетії її становлення як незалежної держави, вона змогла виховати своїх учених і створити свої центри наукової думки та дефектоскопічної апаратури (особливо це стосується ультразвукового та вихрострумного контролю).

Про це можна судити з доповідей, які були зроблені на конференції, і по їх авторах – відомих учених, а також спеціалістів, що працюють на виробництвах та експлуатують апарати й засоби НКТД. На конференції було представлено понад 100 доповідей, тематика яких була присвячена питанням ультразвукового, акустико-емісійного, магнітного, вихрострумного, капілярного, радіаційного, оптичного, теплового методів НК, контролю герметичності, моніторингу технічного стану, оцінки залишкового ресурсу та ін. проблем. Серед авторів – такі відомі вчені як: академік НАНУ Л.М. Лобанов, член-кор. НАНУ З.Т. Назарчук, проф. І.С. Кисіль, проф. І.П. Білокур, проф. О.М. Карпаш, проф. В.О. Троїцький, проф.



В.Д. Рижиков та ін., а також фахівці, які не мають гучних титулів, але роблять свій вагомий внесок у розвиток методів і засобів НК. Більшість із цих доповідей було заслухано на 2-х пленарних та 7-ми секційних засіданнях, які відбулися в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України та у конференц-залах ВЦ «КиївЕкспоПлаза».

За традицією конференцію відкрив заступник директора ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України академік НАНУ Л.М. Лобанов, який привітав усіх із початком роботи конференції та побажав плідної роботи. Потім з доповіддю про діяльність УТ НКТД виступив голова УТ НКТД проф. В.О. Троїцький. Далі на пленарному засіданні було заслухано 11 наукових доповідей, виступи спонсорів конференції та учасників виставки.

На конференції працювали наступні секції:

- теорія та практика фізичних методів контролю зварних конструкцій, матеріалів і виробів;
- моніторинг технічного стану та оцінка залишкового ресурсу об'єктів під час експлуатації;

– неруйнівний контроль та технічна діагностика в нафтогазовій галузі;

– питання стандартизації та сертифікації у неруйнівному контролі та технічній діагностиці;

– неруйнівний контроль та технічна діагностика в авіації.

У рамках конференції традиційно відбулася звітно-виборча конференція УТ НКТД, на якій Правління Товариства відзвітувало про проведено за трирічний період роботи. Були вручені дипломи переможцям і лауреатам другого професійного конкурсу УТ НКТД, який проводився з метою визначення та популяризації досягнень кращих науковців, фахівців, трудових колективів, лабораторій, фірм, підприємств та організацій, що працюють у галузі НКТД в Україні; нагороджено найкращих фахівців України, які зробили значний внесок у розвиток НК та ТД у країні. Було визначено основні завдання Товариства наступні три роки.

В.О. Щечаль, керівник ПЦ ТК «Спецмонтаж»,
член правління УТ НКТД

4-а конференція «Організація неруйнівного контролю якості продукції в промисловості»

З 7 по 14 травня 2006 року відбулася 4-та науково-практична конференція «Організація неруйнівного контролю якості продукції в промисловості». Цього разу конференція проходила у п'ятизірковому готелі Grand Haber у м. Кемер, Туреччина.

Організаторами конференції виступили УТ НКТД, НВФ «Діагностичні прилади», НВФ «Ультракон». Основний обсяг роботи з підготовки та проведення конференції взяли на себе співробітники ПП «ДП-Тест», за що їм персональна подяка.

У конференції взяли участь понад 80 фахівців – представників більш ніж 20 підприємств і організацій.



Учасники конференції в Турції

У науковій програмі конференції було представлено 32 доповіді, серед учасників конференції – 6 докторів наук, 7 кандидатів наук.

З великим інтересом зустріли слухачі доповіді академіка Л.М. Лобанова, проф. В.О. Троїцького, проф. О.М. Карпаша, проф. Л.А. Матвєєвої, проф. Р.Г. Джали, к.т.н. М.Г. Білого, к.т.н. В.Л. Найди, к.т.н. О.К. Лисецької, О.В. Павлія, А.А. Можжухіна, В.А. Наріжного, І.В. Павлія, О.В. Бакаєва, А.Н. Козіна та ін.

Увагу учасників конференції привернули представлені результати досліджень і розробок з вихрострумової та ультразвукової дефектоскопії, рентгеноскопії, рентгенографії, які показали сучасний стан і перспективи цих методів.

Проблемні питання технічного діагностування об'єктів енергетичного комплексу та продовження встановленого терміну служби металевих конструкцій було розглянуто у доповідях Л.М. Лобанова, О.М. Карпаша, Р.М. Джали.

Непоодинокими були випадки, коли доповідачі навмисно відходили від заявленої теми виступу, щоб обговорити найактуальніші проблеми організації неруйнівного контролю та технічного діагностування.



Доповідь академіка НАНУ Л.М.Лобанова

Комфортні умови перебування, тепла погода, лагідне Середземне море в оточенні Тауруських гір, цікава культурна програма, що включила відвідування симфонічного концерту в давньоримському амфітеатрі «Аспендос», морська прогулянка на яхті, дружня вечерея в невимушеній обстановці сприяли активному спілкуванню. Учасники конференції набралися сил, нових вражень і виявили бажання зустрітися знову наступного року.

О.М. Козін, виконавчий директор оргкомітету конференції

Підсумки 9-ї Європейської конференції з неруйнівного контролю у Берліні



Чергова знакова подія у світі неруйнівного контролю відбулася з 25 по 29 вересня 2006 р. у м. Берлін, Німеччина. Близько 1700 офіційних учасників з

усіх континентів зібралися разом на 9-й Європейській конференції з НК, щоб прослухати доповіді фахівців, розповісти про свої досягнення з актуальних проблем і нових напрямків розвитку методів НК, побачити новітні роз-



Члени делегації УТ НКТД на 9-й Європейській конференції з НК

робки приладів і матеріалів для НК, зустрітися з колегами та встановити нові ділові контакти.

Чотири роки напруженої роботи Німецького товариства неруйнівного контролю (DG-ZfP) з організації конференції закінчилися чудовим фіналом, який пройшов у Estrel Convention Center – одному з найбільших виставкових комплексів Європи.

507 пленарних і 216 стендових доповідей було представлено на 116-ти сесіях, які проходили паралельно у восьми залах. Тематика доповідей була присвячена теоретичним питанням методів неруйнівного контролю (ультразвукового, акустико-емісійного, комп'ютерної томографії, цифрової радіографії, магнітного та вихрострумного, інфрачервоного, капілярного, контролю герметичності, вібраційного аналізу, візуального) та їх практичного застосування.

Вже стало гарною традицією для УТ НКТД організувати участь у європейських та всесвітніх конференціях з НК українських спеціалістів – представників колективних членів Товариства. Так, делегації УТ НКТД брали участь у 7-й (м. Копенгаген, 1998 р.) та 8-й (м. Барселона, 2002 р.) Європейських конференціях, а також у 15-й (м. Рим, 2000 р.) і 16-й (м. Монреаль, 2004 р.) Всесвітніх конференціях з неруйнівного контролю.

Ось і цього разу УТ НКТД організувало поїздку на 9-у Європейську конференцію делегації у складі 49 фахівців із 13 міст України, які представляли 28 підприємств та організацій.

Традиційно перед початком урочистої церемонії відкриття конференції проходили наші перші зустрічі з колегами з інших країн, се-

ред яких – президент Італійського товариства з НК Giuseppe Nardoni, президент EFNDT і Британського товариства з НК Mike Farley, президент ICNDT та Канадського товариства з НК Douglas Marshall, президент Болгарського товариства з НК Мітко Міховський, президент Чеського товариства з НК Pavel Mazal, президент Хорватського товариства з НК Vjera Krstelj, віце-президент Іспанського товариства з НК Jesus Сerrano та ін.

Українські вчені та фахівці подали на конференцію загалом 18 доповідей, з них 5 пленарних і 13 стендових. На жаль, не всім нашим авторам вдалося відвідати конференцію та подати свої доповіді. Проте приємно, що за загальною кількістю доповідей, авторами яких є українські фахівці, наша країна посіла почесне 8-е місце.

Серед українських організацій, що представили доповіді про свої розробки в галузі НК, почесне місце посідають Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, фахівці якого підготували 5 доповідей, а також вже згадані НВФ «Спеціальні Наукові Розробки» (4 доповіді) та Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України.

З авторів персонально слід зазначити Г.Я. Безлюдька – директора НВФ «СНР» (4 доповіді), а також В.М. Учаніна – с.н.с. ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, директора Центру «Леотест-Медіум» (3 доповіді, з яких одна з них у співавторстві з німецькими вченими).

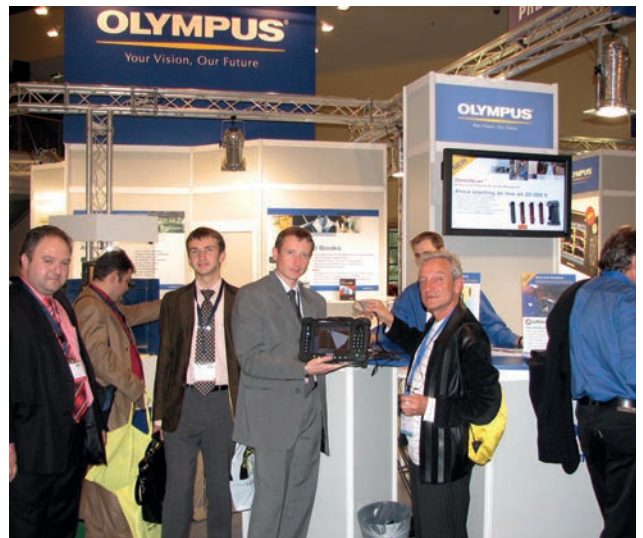
Паралельно із засіданнями секцій близько 100 експонентів представляли свої розробки на виставці, розміщеній у кількох залах Estrel Convention Center на стендах загальною пло-



З президентом ICNDT Douglas Marshall (в центрі)



В.О.Троїцький з президентом EFNDT Mike Farley



щею 1500 м². Крім того, на інформаційних стендах свої країни представляли 22 національні товариства з НК, а також EFNDT та ICNDT.

Традиційно для таких форумів у рамках 9-ї Європейської конференції відбулися засідання Європейської федерації з НК та Всесвітнього комітету з НК.

А.Л. Шекеро, ІЕЗ ім. С.О. Патона НАНУ

14-та Міжнародна конференція з неруйнівного контролю у Ялті

З 16 по 20 жовтня 2006 р. у м. Ялта відбулася 14-а Міжнародна конференція та виставка «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики». Організатори конференції: УІЦ «Наука. Техніка. Технологія» (м. Київ) та НВП «Машинобудування» (м. Дніпропетровськ) за підтримки УТ НКТД та Дніпропетровського національного університету. Генеральний спонсор конференції – МПТПП «ОНІКО» (м. Київ).



«Неруйнівний контроль та технічна діагностика», участь у 9-й Європейській конференції з НК великої делегації українських фахівців, регіональні семінари, численні виставки та багато інших цікавих заходів.

Учасники конференції вітали закордонних гостей. Проф. М. Кренінг (Німеччина) розповів про нові розробки, виконані у Фраунгоферівському інституті неруйнівного контролю, які, на його думку, мають безперечну заці-



У роботі конференції взяли участь 132 фахівці, з яких 40 представляли промислові підприємства, 21 – вузи, НДІ та КБ, 51 – науково-виробничі фірми, 18 – експертні та діагностичні центри. На конференції було представлено 10 пленарних, 26 секційних та 21 стендових доповідей, автори яких доповіли про результати своїх досліджень і розробок за широким спектром методів НК, способів діагностування та прогнозування залишкового ресурсу конструкцій; з оцінки фізико-механічних характеристик матеріалів і деяких інших напрямків, пов'язаних з НКТД.

Про основні підсумки роботи у 2006 р. та основні завдання УТ НКТД на 2007 р. повідомив заступник голови УТ НКТД О.В. Мозговай. Рік видався дуже насиченим: організація та проведення 5-ї Національної конференції

кавленіть для українських підприємств, висловив готовність співпрацювати також і за іншими напрямками: проведення спільних науково-дослідних робіт, стажування студентів, аспірантів, обмін фахівцями. Детальна доповідь Р. Гізе (Німеччина) була присвячена питанням, пов'язаними з рентгенівським методом контролю та успіхам, досягнутим компанією GE Inspection Technology (США) у цьому напрямку. І. Шимкунас, генеральний директор служби технагляду Литви, поділився досвідом проведення НК та ТД в умовах роботи в ЄС, європейської акредитації, а також запропонував свої послуги українським підприємствам, які випускають продукцію за контрактами з європейськими країнами.

О.В. Мозговай, заст. голови УТ НКТД

Науково-практичний семінар «Сучасні технології неруйнівного контролю відповідальних промислових об'єктів»

З 28 листопада по 1 грудня 2006 р. у м. Київ на території Міжнародного виставкового центру відбувся 5-й Міжнародний промисловий форум, у рамках якого було проведено Науково-практичний семінар «Сучасні технології неруйнівного контролю відповідальних промислових об'єктів. Метрологічне забезпечення в НК». Семінар було організовано УТ НКТД спільно з ДП «Укрметрестстандарт». На семінарі заслухано 13 доповідей за наступною тематикою:

далекодючий ультразвуковий контроль протяжних об'єктів з обмеженим доступом до поверхні;

особливості ЕМА-технологій та апаратура для ультразвукового контролю зварних з'єднань;

застосування безпліткових цифрових технологій та апаратури у радіаційному контролі;

нові матеріали для магнітного та капілярного контролю;

метрологічне забезпечення засобів та нових технологій неруйнівного контролю.

У роботі семінару взяли участь біля 80 фахівців з України, Казахстану, Узбекистану, Вірменії, Великобританії, Німеччини та інших країн.

Голова УТ НКТД проф. В.О. Троїцький виступив з оглядовою доповіддю про нові методи й технології неруйнівного контролю металевих конструкцій, а також детально ознайомив учасників семінару з підсумками роботи 9-ї Європейської конференції з неруйнівного контролю, що відбулася у м. Берлін у вересні 2006 р.

Особливу цікавість викликала доповідь Peter Mudge «Принципи далекодючого ультразвукового контролю спрямованими хвилями» (Британський інститут зварювання TWI, м. Кембридж, Великобританія). У своїй доповіді він детально висвітлив фізичні основи поширення низькочастотних ультразвукових хвиль у протяжних об'єктах (трубопроводах), принцип роботи розробленої компанією «Plant Integrity Ltd» (Великобританія) системи «TELETTEST» для діагностики технічного



Peter Mudge проводить практичну демонстрацію системи «TELETTEST» у відділі №4 ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

стану магістральних трубопроводів для транспортування нафти та газу й можливості її застосування для діагностики інших об'єктів. Після закінчення теоретичної частини семінару його учасникам було продемонстровано роботу системи «TELETEST» на макеті трубопроводу завдовжки 50 м із зовнішнім діаметром 114 мм, змонтованого у відділі не-

руйнівного контролю Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

Значний інтерес учасники семінару виявили до всіх без винятку доповідей із зазначеної вище тематики, що прозвучали на семінарі. Загалом семінар пройшов на високому науковому рівні та викликав значний інтерес слухачів.

О.Г. Бондаренко, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ

Новини одним рядком

Відповідно до Угоди про професійну співпрацю з Американським товариством неруйнівного контролю (ASNT) підтверджено статус членства в УТ НКТД керівників ASNT: президента Clyde May та виконавчого директора Neal Couture. Натомість американські колеги подовжили членство в ASNT для голови УТ НКТД проф. В.О. Троїцького та вченого секретаря УТ НКТД А.Л. Шекеро.



Підготовлено та відправлено на погодження й підписання проєкт двосторонньої угоди про професійну співпрацю УТ НКТД з Японським товариством неруйнівного контролю (JSNDI), яка серед іншого передбачає обмін періодичними виданнями, оголошеннями про конференції і освітні програми, новинами, що становлять взаємний інтерес, а

також участь у конференціях, освітніх програмах і загальних зборах на тих самих підставах і за ті ж реєстраційні внески, що встановлені для членів приймаючого Товариства.

Центр сертифікації УТ НКТД розпочав роботи з чергового підтвердження акредитації як органа із сертифікації персоналу згідно з вимогами нової редакції європейського стандарту EN ISO 9712:2022. Актуалізовано комплект документів системи якості з урахуванням змін у новій редакції стандарту. Основні зміни стосуються вимог до виробничого стажу, навчання та кваліфікаційних екзаменів при первинній і повторній сертифікації. Суттєвих змін зазнала процедура продовження терміну дії сертифікації на 3-й рівень за системою накопичення балів.

20 червня 2025 року в онлайн-форматі відбулось засідання Генеральної Асамблеї Європейської федерації неруйнівного контролю (EFNDT). Від України участь в цьому засіданні взяв заступник голови УТ НКТД М.Л. Казакевич. Серед питань, що було розглянуто – обрання місця проведення 15-ї Європейської конференції з НК в 2030 році. Шляхом голосування делегатів національних товариств неруйнівного контролю більшістю голосів було вирішено, що конференцію прийматиме Іспанське товариство з НК в м. Валенсія.

Наказом Міністерства економіки України № 2141 від 11.04.2025 р. визнано таким, що втратив чинність, наказ цього ж міністерства № 17954 від 27.11.2023 р. «Про затвердження Вимог до суб'єктів господарювання, які мають намір виконувати (виконують) експертизу стану охорони праці та безпеки промислового виробництва, проводити (проводять) технічний огляд, експерт-

не обстеження (технічне діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки». Нагадуємо, що цим наказом, серед іншого, було запроваджено обов'язок для суб'єктів господарювання, що провадять діяльність у сферах експертизи стану охорони праці та безпеки промислового виробництва, технічного огляду машин, механізмів, устат-

кування підвищеної небезпеки, експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки бути акредитованими національним органом України з акредитації як органи з інспектування, що здійснюють інспектування як третя сторона.

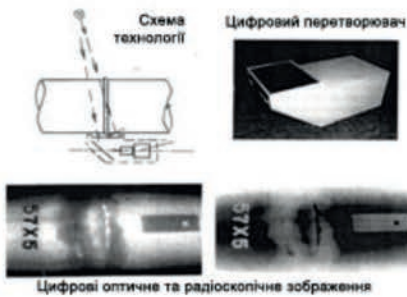
КАЛЕНДАР КОНФЕРЕНЦІЙ ТА ВИСТАВОК З НКТД

13–15 серпня 2025	Сан-Паулу, Бразилія	The 40 th Non-Destructive Testing and Inspection Conference and Exhibition (CONAENDI 2025) (40-а Конференція і виставка з НК та інспекції)	Brazilian Society for NDT
20–22 серпня 2025	Кочі, Керала, Індія	International Conference and Exhibition on Nondestructive Evaluation (ICENDE) (Міжнародна конференція та виставка з НК)	ASNT India
26–28 серпня 2025	Каїр, Єгипет	NDT Corner Expo (Виставка і конференція з НК)	NDT Corner Online Platform
24–26 вересня 2025	Ізмір, Туреччина	The International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering NDT-CE 2025 (Міжнародний симпозіум з НК в цивільному будівництві)	EGE University
06–09 жовтня 2025	Орlando, США	ASNT 2025 – The Annual Conference (Щорічна конференція Американського товариства з НК)	American Society for NDT
11–13 листопада 2025	Литомишль, Чехія	55 th NDE for Safety 2025 / Defectoscopy 2025 (55-а Міжнародна конференція та виставка з НК)	Czech Society for NDT
18–21 листопада 2025	Сяминь, Китай	World Conference on Electromagnetic Nondestructive Testing – WCEMNT 2025 (Всесвітня конференція з електромагнітних методів НК)	Chinese Society for NDT
10–13 лютого 2025	Лінц, Австрія	15 th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT) 2026 (15-а Конференція з промислової комп'ютерної томографії)	University of Applied Sciences Upper Austria
11–14 травня 2026	Гаваї, США	17 th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing (APCNDT 2026) (17-а Азіатсько-Тихоокеанська конференція з НК)	American Society for NDT
19–12 травня 2026	Ліон, Франція	COFREND Days 2026 (Щорічна конференція Французького товариства з НК)	France Society of NDT
15–19 червня 2026	Верона, Італія	The 14 th European Conference on Non-Destructive Testing (14 th ECNDT) (14-а Європейська конференція з НК)	Italian Society for NDT
15–19 травня 2028	Буенос-Айрес, Аргентина	21 st World Conference on Non-Destructive Testing 2028 (21-а Всесвітня конференція з НК)	Argentine Society for NDT



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

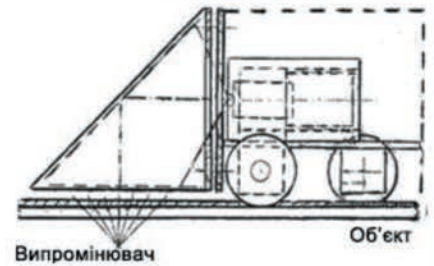
Технологія РТК



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

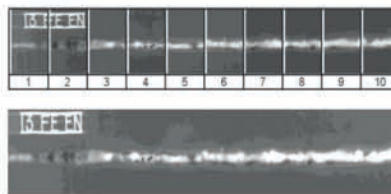
Рухомий РТК-перетворювач на магнітних колесах



ШВИДШЕ

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

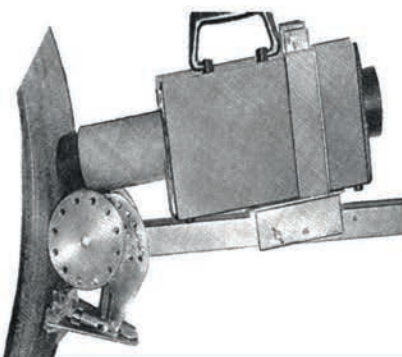
По'єднання окремих цифрових РТК-зображень в одну радіограму об'єкта практично будь-якої форми



ДЕШЕВШЕ

Вартість рентгенотелевізійної 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

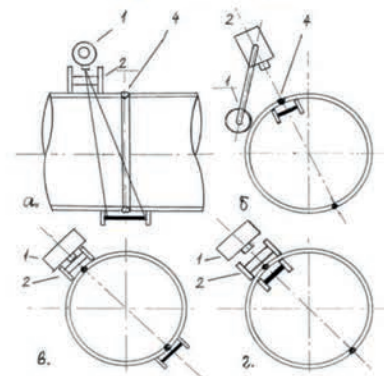


Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики

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



Для виконання рентгенотелевізійного контролю певного об'єкта Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (відділ №4) розробляє технологію, постачає цифрові перетворювачі, навчає та атестує спеціалістів по правилах міжнародної системи сертифікації (EN ISO 9712)