

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

УДК 621.317

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБКИ
ПОВЕРХОНЬ ПРИРОДНИХ КАМЕНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ
НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Черепанська І. Ю., Сазонов А. Ю., Безвесільна О. М.

Національний технічний університет України

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

E-mail: cherepanskairina@gmail.com

Високоточна та швидка оцінка якості оброблюваних поверхонь природних каменів у автоматичному режимі без зупинки технологічного процесу є надзвичайно важливою та специфічною науково-технічною проблемою. Її успішне вирішення сприяє забезпеченню стабільності технологічних процесів, високої якості продукції, конкурентоспроможності каменеобробних підприємств та підвищення ефективності їх функціонування у цілому.

Оцінка якості оброблюваних поверхонь природних каменів здійснюється шляхом вимірювання величини шорсткості на кожному з етапів технологічного процесу. При цьому проблема полягає у тому, що вологість, пил та бруд, які є невід'ємною частиною технологічного процесу обробки поверхонь каменів, унеможливають застосування таких традиційних вимірювальних пристроїв як блискоміри та профілометри [1, 2] безпосередньо у виробничих умовах. Це пов'язано із тим, що на результат вимірювань впливають рівень світлового потоку, колір природного каменю, забрудненість і рівень вологості оброблюваних поверхонь які суттєво знижують точність вимірювання, що є неприпустимим. Очевидно, що застосування вказаних засобів вимірювання вимагає довготривалої зупинки технологічних процесів для попередньої підготовки досліджуваних поверхонь до вимірювання, що є неприпустимим у динамічних виробничих умовах сучасних каменеобробних підприємств.

Метою роботи є представлення розробленої автоматизованої системи визначення якості обробки поверхонь природних каменів для підвищення точності і швидкодії вимірювання та обробки інформації.

Автоматизована система визначення якості обробки поверхонь природних каменів [3] побудована з використанням нейромережєвих технологій. Вона призначена для автоматичної високоточної та швидкої оцінки якості обробки поверхонь різної природи, у тому числі природних каменів, в режимі реального часу без переривання технологічного процесу. Структурна схема системи приведена на рис. 1.

Автоматизована система визначення якості обробки поверхонь природних каменів містить інтелектуальну і електромеханічну підсистеми. Електромеханічна підсистема містить ультразвукові датчики Д1 та Д2 для вимірювання відстані, датчик Д3 струму, модуль живлення (МЖ), головний виконавчий механізм (ВК) з обробляючою шліфувальною голівкою, мікроконтролер (МК), функціональний перетворювач (на рис. 1 не показаний). Інтелектуальна підсистема містить штучну нейронну мережу (ШНМ) інтегровану як спеціалізований застосунок в операційну систему портативного комп'ютера (ПК), Wi-fi– модуль передачі даних на відстань.

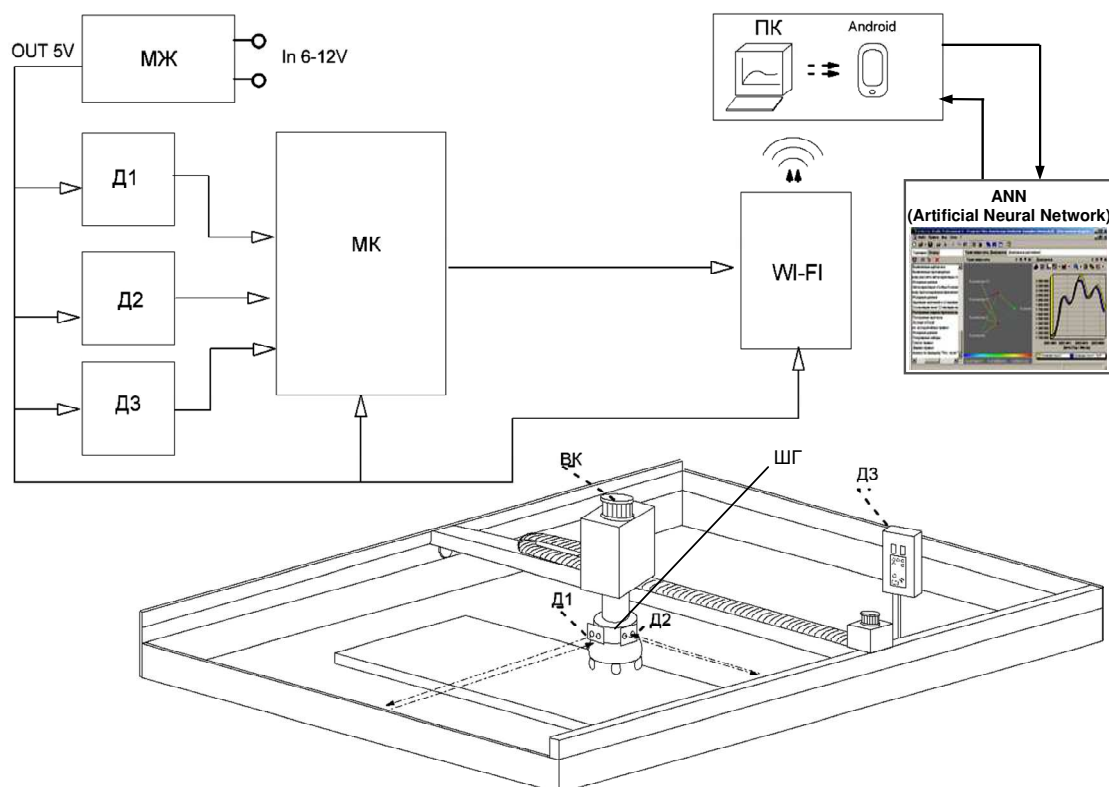


Рис. 1. Структурна схема автоматизованої системи визначення якості обробки поверхонь природних каменів: Д1, Д2 – датчики відстані, Д3 – датчик струму, МЖ – модуль живлення, ВК – головний виконавчий механізм з обробляючою шліфувальною голівкою ШГ, МК – мікроконтролер, Wi-fi– модуль передачі даних на відстань, ANN – штучна нейронна мережа, ПК – портативний комп'ютер

Ультразвукові датчики Д1, Д2 встановлені безпосередньо на оброблювальній шліфувальній голівці (ШГ) приводу різального інструменту та формують на площині вісі прямокутної системи координат, по яким переміщується ШГ і використовуються для визначення координат переміщення робочого валу головного двигуна.

При шліфуванні або поліруванні поверхні змінюється величина її шорсткості (рис. 2), яка пов'язана із величиною споживаного струм на валу ВК, що споживається приводом головного руху каменеобробного верстату під час його роботи.

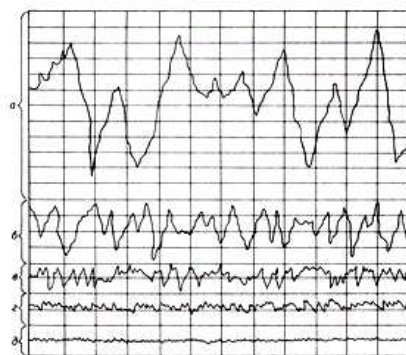


Рис. 2. Зміна споживаного струму на валу головного виконавчого механізму ВК на різних стадіях обробки гранітного каменю шліфувальним інструментом: а – грубе шліфування (обдирання), б – середнє шліфування, в – тонке шліфування, г – доводочне шліфування (лощіння), д – полірування

Величина амплітуди коливань та миттєве значення струму корелюють із навантаженням на валу приводу головного руху верстату. Навантаження спричинене механічним опором з боку поверхні каменю функціонально залежить від шорсткості цієї поверхні.

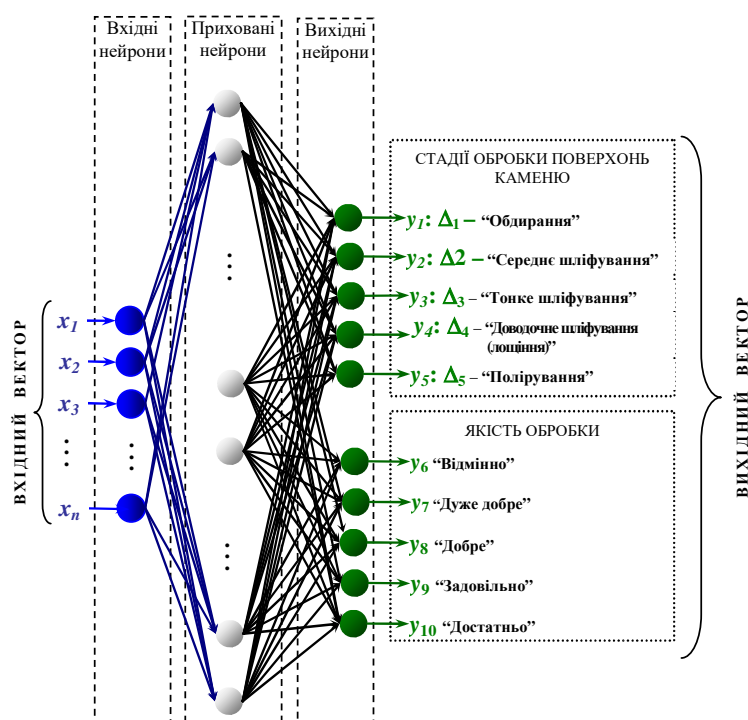


Рис. 3. Схематична структура ШНМ для автоматичного визначення якості обробки поверхонь природних каменів

Тому постійне безперервне вимірювання величини споживаного струму дозволяє безпосередньо відслідковувати зміну шорсткості та визначати її величину в режимі реального часу. Для цього використовується датчик ДЗ струму, покази якого передаються на МК. Сигнали з МК подаються на вхід ШНМ, яка навчена автоматично визначати якість обробки поверхні каменю. Структура ШНМ

представлена на рис. 3. Вона розроблена за принципами побудови багатошарового перцептронну.

ШНМ навчена за методом "навчання з вчителем" та алгоритмом “зворотного поширення помилки”. В якості навчальної вибірки використовувались дані натурного експерименту проведеного на діючому каменеобробному підприємстві в Житомирській області. Зокрема ШНМ була навчена визначати досягнуту якість під час обробки поверхні каменю в режимі реального часу за результатами багаторазових вимірювань величини миттєвих значень та амплітуди споживаного струму на різних стадіях шліфування. На рис. 4 представлено приклад результатів вимірювання миттєвих значень споживаного струму шліфувальним верстатом при різній якості обробки поверхні на відповідних стадіях шліфування.

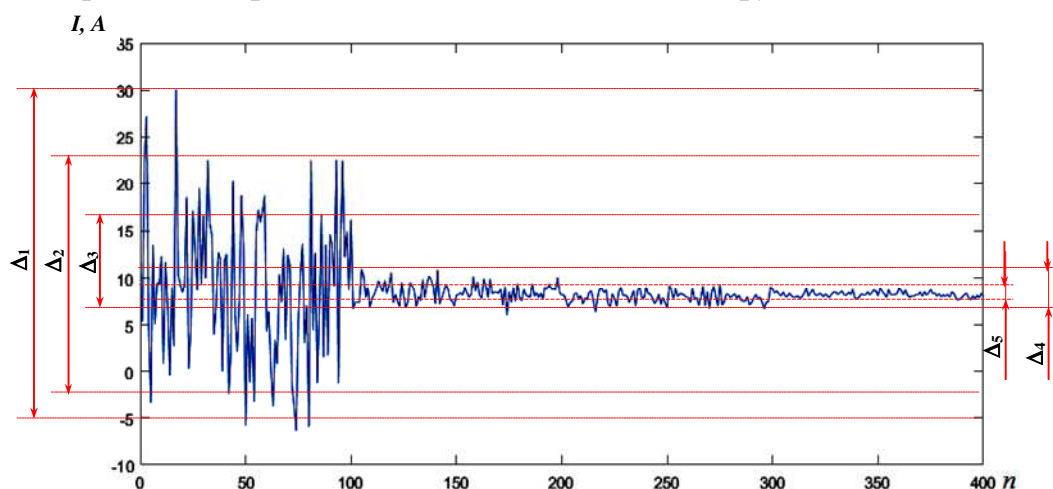


Рис. 4. Миттєві значення споживаного струму приводом головного руху верстату на різних етапах шліфування: Δ_1 – розкид миттєвих значень струму при грубому шліфуванні (обдиранні), Δ_2 – розкид миттєвих значень струму при середньому шліфуванні, Δ_3 – розкид миттєвих значень струму при тонкому шліфуванні, Δ_4 – розкид миттєвих значень струму при доводочному шліфуванні (лощинні) Δ_5 – розкид миттєвих значень струму при поліруванні

За критерій оцінки достовірності результатів роботи ШНМ прийнято середньо квадратичну похибку, величина якої не повинна перевищувати 0,05. Результати комп'ютерного моделювання роботи ШНМ вказують на її високу точність та швидкодію. Зокрема час оцінки якості для кожної стадії обробки поверхні каменю не перевищує 2 с, середня квадратична похибка не перевищує заданого значення 0,05.

Ключові слова: штучна нейронна мережа, якість обробки поверхні каменю, точність, швидкодія, автоматизована система.

Література

- [1]. О. Л. Гелета, І.А. Сергієнко, О.В. Горобчишин, «Оцінка блиску полірованої поверхні декоративного каміння», *Коштовне та декоративне каміння*, 2011, № 3, С. 12–15.
- [2]. В. В. Коробійчук, А. О. Криворучко, Н. С. Ремез, К. К. Ткачук, Р. В. Соболевський «Оцінка якості блочної сировини та облицювальної продукції з природного каменю», Ч.1: навч. посібник, Житомир: ЖДТУ, 2012, 188 с.

- [3]. А.Ю. Сазонов, І.Ю. Черепанська, С.В. Кальчук, О.М. Безвесільна, Ю.Б. Бродський, Спосіб визначення якості обробки поверхні каменю, Патент на винахід 121727; МПК: (2020.01) G01B 21/30 (2006.01), B28D 1/00, B24B 5/00., UA 121727 C2; заявл. 15.04.2019; надр. 10.07.2020, Бюл.№ 13

УДК 535.361: 620.186

**ЗАСТОСУВАННЯ ПКВМ-МІКРОКОНТРОЛЕРА PSoC5
У СЕНСОРІ ДИFUЗНОГО ВІДБИВАННЯ СВІТЛА
ДЛЯ ОЦІНКИ РОЗМІРУ КОРОЗІЙНИХ ЗЕРЕН**

Джала Р. М., Івасів І. Б., Червінка Л. Є., Червінка О. О.

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

E-mail: dzhala.rm@gmail.com, igreg@ukr.net, luda.chervin@googlemail.com

Розглядається задача оцінювання характеристик корозійного ураження поверхні металу виду субміліметрових корозійних плямок, сформованих скупченнями продуктів корозії на елементах мікроструктури поверхні. Важливою є інформація як про загальну поверхневу концентрацію корозійних плямок, так і про середні розміри мікрозерен продуктів корозії всередині цих плямок, що дозволяє точніше оцінювати характер корозійних уражень та передбачати їх розвиток. Оцінювання вказаних характеристик пропонується здійснювати на основі сигналів сенсора дифузного відбивання світла [1], що дає можливість побудувати компактний переносний прилад для оперативного оцінювання ранніх стадій корозійного ураження конструкцій в польових умовах.

У такому приладі середні розміри зерен продуктів корозії оцінюються за допомогою розподілу на фотолінійці інтенсивності світла, дифузно відбитого вказаними корозійними дефектами поверхні металу. В загальному випадку це вимагає розв'язування складної оберненої задачі із застосуванням потужних обчислювальних ресурсів. Зокрема, у праці [1] розглядалося оцінювання розмірів мікродефектів на основі зворотного методу Монте-Карло, що полягав у мінімізації відхилення модельованого і виміряного сигналу в евклідовій метриці для випадкової марківської послідовності моделей розподілу мікродефектів. Крім того, розв'язок цієї задачі суттєво залежить і від похибок вимірювання.

Для зменшення потрібних обчислювальних ресурсів запропоновано розглядати інші інформативні параметри сигналу з відповідними метриками, що дає можливість застосувати простіші алгоритми розв'язування задачі оцінювання розмірів корозійних мікрозерен. Так, у [2] запропоновано оцінювати розміри мікрозерен за критерієм гладкості обвідної сигналу. В праці [3] запропоновано в якості метрики застосовувати різницю положень екстремумів обвідної сигналу, яка більш стійка до випадкового розташування корозійних плямок. Це дозволяє застосувати деякі простіші алгоритми машинного навчання з попереднім тренуванням (зокрема, регресійний аналіз, нейронні мережі чи кластеризацію у парі з методом опорних векторів), а в якості обчислювача для «тренуваних» алгоритмів – мікроконтролер.

У даній роботі пропонуємо застосовувати для сенсора дифузного відбивання світла ПМКМ-мікроконтролер PSoC5 компанії Cypress Semiconductor. Перевагою цього мікроконтролера є не лише потужні обчислювальні можливості на базі ядра Arm Cortex-M3, але й розвинена система програмно синтезованої цифрової та аналогової периферії. Це дає можливість використовувати мікроконтролер як у якості обчислювача, так і замінити більшу частину наявного блоку електроніки, показаного на рис. 1 [4].

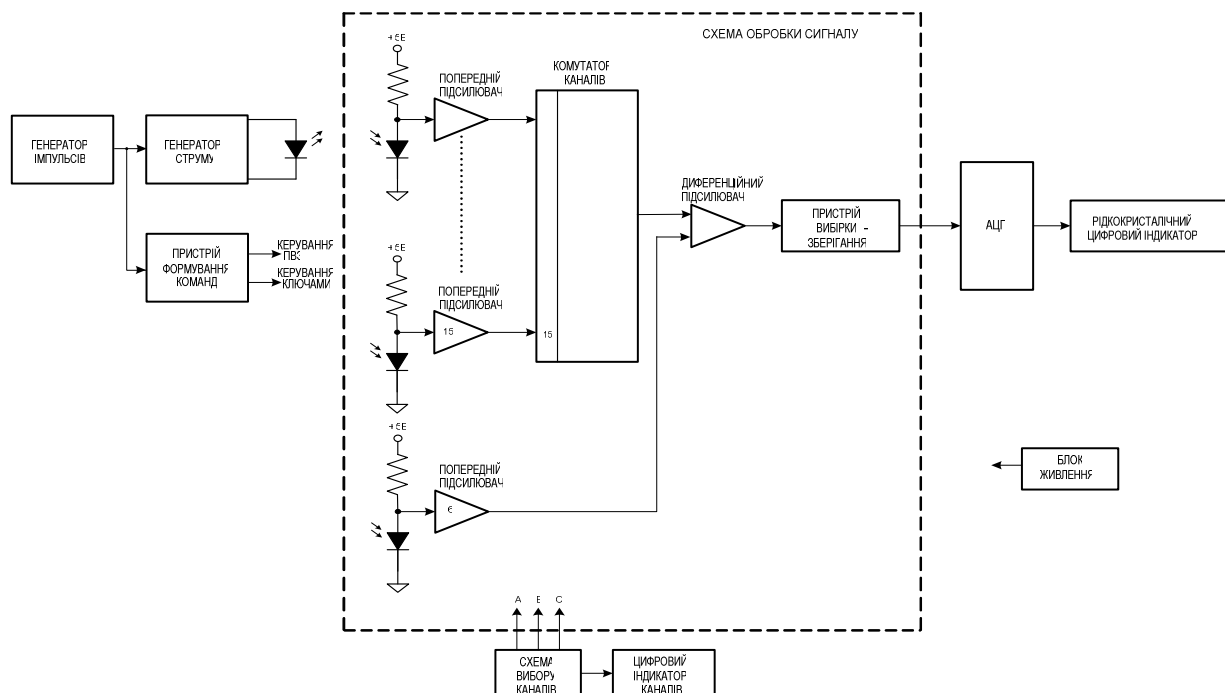


Рис. 1. Блок електроніки сенсора дифузного відбивання світла

Зокрема, це генератор імпульсів, пристрій виконання команд, схема вибору каналів, комутатор каналів, диференційний підсилювач та АЦП повністю заінтегровано у вибраному мікроконтролері. Також відпала потреба у пристрої вибірки/зберігання, який вносив додаткову похибку. Додатково, реалізовано цифрове вирівнювання коефіцієнтів підсилення для попередніх підсилювачів під час калібрування, а також нагромадження та усереднення даних з АЦП для кожного каналу. Все це дало змогу суттєво зменшити похибки вимірювання.

Ключові слова: корозійні зерна, оцінка розміру, дифузне відбивання світла, сенсор, машинне навчання, ПМКМ-мікроконтролер.

Література

- [1] І. Б. Івасів, “Контроль пошкоджень поверхні методом дифузного відбивання світла”, у *Технічна діагностика матеріалів і конструкцій*, Довідниковий посібник. З.Т. Назарчук, заг. ред. Том IV *Електрофізичні методи неруйнівного контролю дефектності елементів конструкцій*, Р.М. Джала, ред. Львів: Простір-М, 2018, с. 296-341.
- [2] І. Б. Івасів, “Оцінка розмірів корозійних виразок за критерієм гладкості обвідної сигналу сенсора дифузного відбивання світла”, *Відбір і обробка інформації*, Вип. 44 (120), с. 45-50, 2016.

- [3] I. B. Ivasiv, “Estimation of errors in determining corrosion grain sizes by analysis of diffuse light reflection signal”, *Відбір і обробка інформації*, вип. 48(124), с.25-34, 2020. doi:10.15407/vidbir2020.48.025
- [4] Р. М. Джала, І. Б. Івасів, Л. Є. Червінка, О. О. Червінка, “Сенсор дифузного відбивання світла для раннього виявлення пошкоджень лакофарбових покриттів”, *Відбір і обробка інформації*, вип. 42(118), с.58-67, 2015.

УДК 53.082:620.1:656.56

ПОРТАТИВНІ ПРИЛАДИ ОРТ ДЛЯ ДІАГНОСТИЧНИХ ОБСТЕЖЕНЬ ПІДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

Джала Р. М., Вербенець Б. Я., Джала В. Р., Семенюк О. М.

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

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

Обстеження підземних трубопроводів (ПТ) першочергово потребують виявлення їх місцезнаходження [1-2]. Практично для цього використовують шупи, біолокацію і трасошукачі. В останніх найчастіше використовують індукційний сприймач магнетного поля (МП), створеного змінним струмом, що протікає по трубопроводу.

Відомі раніше трасошукачі [2] склалися з індукційної рамки, яку переносили у руках, або котушки з феритовим осердям, прикріпленої на кінці штанги (ручки) і з'єднаної з підсилювачем та індикатором. Основним їх недоліком, крім великих габаритів і незручностей у використанні, була низька захищеність від завад: впливи електромагнітного поля ліній електропередач часто не давали можливостей здійснювати пошук ПТ чи кабелів.

Перші портативні трасошукачі типу ОРТ для безконтактного визначення місцезнаходження, напряму і глибини залягання ПТ та інших захованих струмопровідних комунікацій були створені [1-3] завдяки запропонованому творчим колективом у ФМІ пристрою зі спеціальним розміщенням магнетосприймача і елементів підсилювального блоку у малогабаритному корпусі [3]. Це вдаль технічне рішення дало можливість розробити низку ефективних трасошукачів ОРТ (рис. 1, рис. 2) та наступні комплексні двофункційний портативні прилади типу ОРТ+В для безконтактного визначення розміщення і контактних вимірювань електричних потенціалів ПТ та інших металевих конструкцій у електропровідному середовищі.

У приладі типу ОРТ сигнал поступає від резонансного індуктивного давача, настроєного на частоту корисного сигналу для попереднього виділення його на фоні завад. Цей сигнал підсилюється попереднім підсилювачем з невеликим коефіцієнтом підсилення і великим входним опором. Основне підсилення сигналу здійснюється у масштабному підсилювачі, коефіцієнт підсилення якого вибирає оператор дискретно у чотирьох діапазонах. Підсилений корисний сигнал фільтрується двома каскадами смугових фільтрів.



Рис. 1. Зразки портативних трасошукачів типу OPT.

Для більшого підсилення слабких сигналів при орієнтації давача на вісь трубопроводу використано логарифмічний підсилювач. Випростувач напруги формує однополярний вихідний сигнал, який подається на стрілковий індикатор, за яким здійснюють візуальний контроль рівня сигналу під час орієнтації давача на вісь ПТ.



Рис. 2. Пошук газопроводу на заводській території приладом OPT.

Змінний струм у ПТ (МП якого використовують для їх пошуку) можна збуджувати генератором індукційно, або через підключення до труби і заземлення. Практично на більшості магістральних трубопроводів є установки катодного захисту (УКЗ), від яких у трубопровід подається випрямлений струм промислової частоти. Завдяки високій електропровідності металевих трубопроводів і їх великій протяжності у них концентруються електричні струми від різних джерел, у тому числі і від далеких УКЗ. Це дає можливість у

Секція 7. НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ,
ТЕХНІЧНА ТА МЕДИЧНА ДІАГНОСТИКА, ПІДГОТОВКА ФАХІВЦІВ ГАЛУЗІ

більшості випадків визначати місцезнаходження ПТ безконтактним методом без використання спеціальних генераторів струму.

Відомо [1], що електричний струм вздовж труби круглого профілю створює у просторі МП, еквівалентне полю лінійного струму, розміщеного вздовж осі труби. Силкові лінії цього поля напрямлені перпендикулярно до струмопроводу по дотичній до концентричного йому кола (азимутально). Для прямолінійного струму J МП $H_\phi = J / 2\pi r$, де r – віддаль між струмом і точкою спостереження.

Розміщення струмопроводу визначають за екстремумами сигналу при переміщеннях і поворотах сприймача МП (давача сигналу). Сигнал пропорційний проекції вектора напруженості МП на вісь давача (напрямок його найбільшої чутливості). У пов'язаних з віссю ПТ декартових координатах, при переміщеннях поперек траси вертикально орієнтованого давача функція профілювання описується формулою

$$H_y = \frac{-J}{2\pi} \cdot \frac{x}{x^2 + y^2}, \quad (1)$$

а для давача, орієнтованого під кутом 45° до вертикалі, маємо

$$H_{45} = \frac{J}{2\pi\sqrt{2}} \cdot \frac{y - x}{x^2 + y^2}. \quad (2)$$

Вираз (2) описує криву з нульовим значенням при $x = y$. Цю залежність використовують для оцінки глибини залягання ПТ, проте слід зауважити, що у довідниках іноді вона зображена невірно. На рис. 3 показано криві, які описуються формулами (1) – штрихова лінія $U_y(x)$ і (2) – суцільна лінія $U_{45}(x)$ при $y = h$.

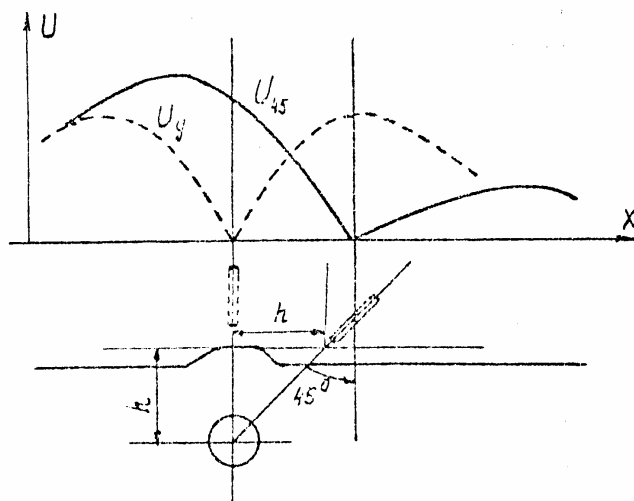


Рис. 3. Схема визначення місця і глибини залягання ПТ.

При цьому вважається, що сигнал пропорційний амплітуді відповідної компоненти змінного МП. Важливо, що крива профілювання для нахиленого давача несиметрична. Це необхідно враховувати під час визначення глибини залягання трубопроводу за схемою, поданою на рис. 3.

Ключові слова: трубопроводи підземні, безконтактні трасошукачі, обстеження діагностичні, контроль розміщення, прилади.

Література

- [1] Р. М. Джала, “Основи обстеження і контролю корозійного стану підземних трубопроводів”, у *Міцність та довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів*, «Механіка руйнування та міцність матеріалів», Довідн. посібник, Під заг. ред. В.В. Панасюка. Львів, Україна: Сполом, Том 11, Розділ 6, с. 143-184, 2009.
- [2] Р. М. Джала, Б. Я. Вербенець, Б. І. Горон, О. І. Сенюк, «Завадостійке визначення розміщення підземного трубопроводу», *Відбір і обробка інформації*, Вип. 46 (122), с. 11-18, 2018. <https://doi.org/10.15407/vidbir2018.46.011>
- [3] Р. М. Джала, Б. Я. Вербенець, Пристрій для визначення розміщення та контролю протикорозійного захисту підземних трубопроводів, *Патент на винахід* 108724, МПК: G01V 3/15 (2006.01), G01R 19/25 (2006.01), C23F 13/04 (2006.01), G01N 17/02 (2006.01), UA 108724 C2, опубліковано 25.05.2015, Бюл.№ 10.

УДК 621.391:519.72

ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВІБРАЦІЙНОГО СИГНАЛУ ВІД ЕЛЕМЕНТУ МЕХАНІЗМУ З ТРІЩИНОЮ

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

¹⁾Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, відділ методів і засобів відбору та обробки діагностичних сигналів, Львів, Україна,

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

³⁾Бидгоцька політехніка, інститут телекомунікацій, Бидгощ, Польща

E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com

Аналізуючи вібраційні сигнали від елементів механічних обертових систем слід застосовувати методи статистичного аналізу, що ґрунтуються на теорії та методах періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП) [1], а також використовувати методи взаємного аналізу ПКВП [2]. Більшість дослідників розглядають вібраційний сигнал як випадковий стаціонарний процес, а всі обчислення проводять у стаціонарному наближенні. Якщо вважати, що спектральна щільність потужності є однією з найінформативніших характеристик вібраційного сигналу, тоді аналіз в стаціонарному наближенні дозволить виявляти лише розвинуті дефекти. Тому, виявляти дефект від елементу механізму з тріщиною на ранній стадії розвитку, користуючись таким підходом, непросто.

Дослідження зміни спектральних властивостей вібраційного сигналу проводять на основі аналізу вібраційних сигналів від тонкої пластини з тріщиною, до кінців якої прикладена зовнішня циклічна сила. У [3, 4] показано, що тріщина призводить до появи нестационарності у вібраційному сигналі. Чим більша тріщина, тим більшими за величиною є вищі кореляційні компоненти ПКВП, що описують вібраційний сигнал. Слід зауважити, що вимушені коливання тонкої пластини з тріщиною описують за допомогою системи

нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку [5]. У роботі [3] показано, що модель вібраційного сигналу від тонкої пластини з тріщиною має 3 стаціонарні компоненти і може бути подана у такій формі:

$$\xi(t) = \eta_0(t) + \sum_{k=1}^2 \eta_k^s(t) \sin k\omega_0 t + \eta_k^c(t) \cos k\omega_0 t. \quad (1)$$

Компоненти кореляційної функції такої моделі, згідно з [3], є громіздкими для оцінювання і нелегкими для інтерпретації. Тому аналіз спектральних властивостей сигналів вібрації проводять з використанням оцінок взаємоспектральних щільностей виділених стаціонарних компонент. Для оцінювання останніх був обраний корелограмний метод Блекмана-Тюкі, згідно з яким оцінки спектральних щільностей мають вигляд

$$\hat{f}_{kl}^{cs}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n \in \mathbb{Z}} \hat{R}_{kl}^{cs}(nh) k(nh) e^{-i\omega nh}, \quad (2)$$

де $\hat{R}_{kl}^{cs}(nh)$ – оцінки взаємкореляційних функцій:

$$\hat{R}_{kl}^{cs}(jh) = \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{K-1} [\xi_k^c(nh) - \hat{m}_k^c] [\xi_l^s((n+j)h) - \hat{m}_l^s],$$

$\hat{m}_k^c$ і $\hat{m}_l^s$ – оцінки математичних сподівань

$$\hat{m}_l^{c,s} = \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{K-1} \xi_l^{c,s}(nh),$$

а $K = \frac{\theta}{h}$, h – крок дискретизації; θ – довжина реалізації. Функція $k(u)$ є так званим кореляційним вікном, що задовольняє умови: $k(0) = 1$, $k(-u) = k(u)$, $k(u) = 0$ при $|u| > u_m$, u_m – точка усічення корелограми. У даній обробці використовується вікно Хемінга. Це вікно характеризується низьким рівнем бокових пелюсток і легкістю в обчисленні. Статистичні оцінки (2) визначаються при вибраному вікні довжиною реалізації $\theta = kh$ точкою усічення корелограми u_m та кроком дискретизації h . Ця оцінка є слушною, тобто її середньоквадратична похибка прямує до нуля при $\theta \rightarrow \infty$, і має задовільну роздільну здатність. Якщо спектральні щільності зосереджені в певній смузі частот $[-\omega_{\max}, \omega_{\max}]$, то для того, щоб уникнути ефекту накладання, крок дискретизації h вибирають згідно з умовою $h < \frac{\pi}{\omega_{\max}}$.

Для подальшого аналізу будують модулі найбільш значущих взаємоспектральних функцій при різних відносних довжинах тріщин $\Delta l/l = 0.1$, $\Delta l/l = 0.5$, $\Delta l/l = 0.7$. Збільшення довжини тріщини буде суттєво змінювати величини модулів оцінок спектральних щільностей. За діагностичний критерій для виявлення розвитку тріщини слід вибирати площі під графіками модулів взаємоспектральних щільностей спектральних компонентів.

Ключові слова: вібраційний сигнал, спектральна щільність, взаємоспектральна функція, тріщина.

Література

- [1] І. М. Яворський, *Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань*. Львів : Фіз.-мех. ін-т НАН України, 802 с., 2013.
- [2] I. Jaworski, R. Juzefowycz, Z. Zakrzewski, J. Majewski, “Wzajemna koherentna analiza kowariancyjna łącznie okresowo niestacjonarnych sygnałów losowych o nieznanym okresie”, *Przegląd Telekomunikacyjny*, № 8–9, pp. 831–834, 2018.
- [3] І. Й. Мацько, І. Б. Кравець, І. М. Яворський, В. М. Заяць, “Модель вібраційного відгуку від тіла з тріщиною”, *Відбір і обробка інформації*, № 30(106), с. 12–22, 2009.
- [4] . Й. Мацько, І. Б. Кравець, Р.М. Юзефович, І. М. Яворський, “Вплив розміру тріщини на кореляційну структуру вібраційного сигналу”, *Відбір і обробка інформації*, № 31(107), с. 18–25, 2009.
- [5] Gelman L., Gorpinich S., “Non-linear Vibroacoustical Free Oscillation Method For Crack Detection And Evaluation”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 14(3), pp. 343–351, 2000.

УДК 620.179.14

ВИХРОСТРУМОВИЙ КОНТРОЛЬ ВИРОБІВ СКЛАДНОЇ ФОРМИ ІЗ НЕМАГНІТНИХ АУСТЕНІТНИХ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ ВИЩИХ ГАРМОНІК

Учанін В. М.

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

E-mail: vuchanin@gmail.com

Для оцінювання якості виробів із феромагнітних матеріалів широке застосування знайшли методи вихрострумового контролю (ВК) на основі аналізу вищих гармонік (ВГ) вихідного сигналу вихрострумового перетворювача (ВСП), який базується на нелінійних властивостях феромагнітних матеріалів. Вперше можливість використання ВГ для аналізу структурно-механічних властивостей феромагнітних матеріалів зазначив академік М. С. Акулов ще у 1934 році. Але найсуттєвіших результатів досягнуто в численних дослідженнях і розробках Р. Є. Єршова, М. М. Зацепіна, І. Г. Лещенка, М. М. Шеля, О. Д. Покровського та інших. Серед українських дослідників найбільший внесок у розвиток методу ВГ напрацювали К.В. Маркевич та В. В. Черняк.

Метод ВГ можна використовувати для контролю змін структури виробів з немагнітної аустенітної сталі в результаті деформації або зварювання. До таких сталей відносяться аустенітні хромонікелеві сплави (наприклад, типу 12X18H10T і 12X18H9T), які широко використовують через задовільне співвідношення пластичності і міцності та високу корозійну стійкість. Через метастабільність таких сталей за дії пластичної деформації протікає аустеніт-мартенситне перетворення ($\gamma \rightarrow \alpha'$). Явище мартенситного перетворення в аустенітних сталях під дією напружень і деформацій відоме, зокрема, з літератури [1-3]. Можливість застосування магнітного і вихрострумового

методів структуроскопії для контролю змін структури таких гетерогенних матеріалів, які утворюються у цьому випадку, базується на оцінюванні частки деформаційного мартенситу, який на відміну від аустеніту, має феромагнітні властивості.

Цікавішими є можливості використання методу ВГ для виявлення дефектів виробів з немагнітної аустенітної сталі. Тут, на відміну від відомих способів вихрострумової дефектоскопії, можна виявляти не стільки порушення суцільності матеріалу, скільки реєструвати локальні фазові зміни в зоні вершини дефекту (тріщини). Суть в тому, що в зоні вершини тріщини формується локальна зона напружень і деформацій [1]. Через це під час утворення дефекту процес мартенситних перетворень проходить локально біля його вершини, коли в аустенітній матриці основного металу з'являється локальне мартенситне включення. Під час перемагнічування феромагнітного включення електромагнітним полем, яке змінюється в часі за синусоїдальною залежністю, у вторинному полі вихрових струмів за певного рівня первинного поля з'являються гармонічні складові. В той же час, зміни вихідного сигналу, пов'язані з факторами, що сприяють утворенню завад, формуються тільки на основній робочій частоті, тобто на гармоніки вихідного сигналу не впливають.

Такий підхід особливо ефективний (а можливо і безальтернативний) під час ВК виробів складної форми із немагнітних аустенітних сталей, де він дозволяє повністю усунути завади, пов'язані зі складною геометрією поверхні об'єкту контролю (ОК). Характерним прикладом є дефектоскопія профільних прямокутних трубок зі змінним по довжині перерізом за допомогою диференційного ВСП прохідного типу (рис. 1).

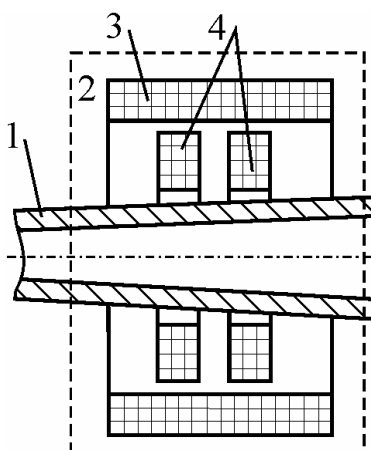


Рис. 1. Прокідний диференційний ВСП: 1 – контрольована трубка змінного профілю; 2 – ВСП; 3 – обмотка збудження; 4 – вимірювальні обмотки

Трубки із аустенітної сталі 08X18H10T з товщиною стінки близько 0,3 мм виготовляють методом гідроформування, під час якого утворюються неприпустимі тріщини. Звичайний ВК прохідними ВСП неможливий через змінний переріз трубок і відповідну зміну коефіцієнта заповнення ВСП.

Контроль обертальними ВСП також неможливий через прямокутний профіль трубок.

Дослідження, проведені в ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ під керівництвом А. Я. Тетерка, показали, що ця задача може бути успішно вирішена за допомогою методу ВГ. Найкращі результати було отримано на основі реєстрації 5-ої гармонічної складової сигналу прохідного диференційного ВСП у складі дефектоскопа ДУЕТ-2. Схема дефектоскопа дозволяє виділяти гармонічні складові сигналу ВСП відповідним вибором частот селективного підсилювача і сигналу опорного генератора, що надходить на змішувач перетворювача частот. Контроль проводили на основній робочій частоті 5 кГц. Практика показала, що розроблена технологія ВК дозволила виявляти тріщини глибиною близько 3 % від товщини трубки. При цьому за аналізом фазового кута годографу сигналу від дефекту в комплексній площині проводили диференціацію тріщин від дефектів типу наклеп, які допускалися. Після відпалювання дефектних трубок чутливість до дефектів повністю зникала через зворотне перетворення мартенситних включень в аустеніт. Це підтверджує, зазначений вище, механізм утворення гармонічних складових сигналу ВСП за рахунок нелінійних феромагнітних властивостей локального мартенситу деформації в зоні дефекту.

Іншим прикладом є ВК зварних швів конструкцій із аустенітних сталей, які в зоні зварного шва мають складну нерегулярну геометрію через наявність валика підсилення або можливе зміщення (депланацію) кромок після видалення валика підсилення. Складна поверхня ОК в зоні зварного шва створює суттєві перешкоди під час її сканування накладними ВСП, через що чутливість вихрострумової дефектоскопії суттєво обмежується [4].

Подальші дослідження показали важливість вибору достатньо високого рівня первинного поля обмотки збудження, за якого феромагнітні властивості мартенситу якнайбільше впливають на нелінійність процесів перемагнічування. Такий підхід дозволив оптимізувати технологію вихрострумової дефектоскопії виробів із аустенітних сплавів методом ВГ [5]. Крім того вдосконалюються способи виділення гармонічних складових сигналу ВСП [6].

Ключові слова: вихрострумовий контроль, дефектоскопія, метод вищих гармонік, гармонічні складові, профільні трубки, зварний шов, аустенітна сталь, деформаційний мартенсит, тріщина.

Література

- [1] *Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. пос., Т. 15: Остап О.П. Структура матеріалів і втомна довговічність елементів конструкцій (розділ 2.2. Структура поля напружень і деформацій в околі тріщин і геометричних концентраторів напружень), Львів: СПОЛОМ, 2015.*
- [2] Л. М. Лобанов, В. А. Нехотящий, А. Л. Палиенко, Г. Я. Безлюдько, “Исследование деформационного воздействия на стали 08Ч18Н9 и 12Ч18Н10Т в сварных сосудах и трубах”, *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, № 3, с. 7–10, 2015.

- [3] A. P. Knutsson, P. Hedström, M. Odén, “Reverse martensitic transformation and resulting microstructure in a cold rolled metastable austenitic stainless steel,” *Steel research Int*, 79(6), pp. 433–439, 2008.
- [4] В. М. Учанін, *Накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання*. Львів, Україна: СПОЛОМ, 2013.
- [5] В. М. Учанін, "Спосіб вихрострумової дефектоскопії конструкцій і виробів із аустенітних сталей", *Пат. України* № 146773, МПК G01N27/90, Опубл. 17.03.21, Бюл. № 11.
- [6] В. М. Учанін, "Пристрій для виділення гармонічних складових у вихідному сигналі вихрострумового перетворювача," *Заявка на винахід України* № а 2021 06465 МПК G01N27/90 від 16.11.21.

УДК 621.391:519.72

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МЕХАНІЗМІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ПЕРІОДИЧНО КОРЕЛЬОВАНИХ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ

^{1,2)}Юзефович Р. М., ¹⁾Личак О. В., ¹⁾Курапов П. Р., ¹⁾Варивода М. З., ^{1,3)}Яворський І. М.

¹⁾Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, відділ методів і засобів
відбору та обробки діагностичних сигналів, Львів, Україна,

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

³⁾Бидгощська політехніка, інститут телекомунікацій, Бидгощ, Польща

E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com

На даний час існує багато різних методів та засобів отримання інформації про стан технічних об'єктів, за допомогою яких проводять оцінювання працездатності механічних систем та здійснюють пошук дефектних елементів у механічних системах у процесі їх експлуатації. Основним носієм інформації про технічний стан механічних систем є вібраційний сигнал (віброприскорення, віброшвидкість, вібропереміщення), що збуджується у результаті механічної взаємодії деталей механізмів, наприклад, зубчастих пар, тіл кочення, сепаратора та кульок у підшипниках, пар коліс у редукторах, циліндра і поршня у двигуні внутрішнього згоряння тощо. Для опису і аналізу закономірностей структури отриманих вібраційних сигналів необхідно обґрунтувати адекватні математичні моделі цих сигналів, методи і алгоритми їх комп'ютерної обробки для виділення відповідних діагностичних ознак і прийняти рішення про стан об'єкта [1–4]. У більшості випадків механічна вібрація, що виникає в елементах досліджуваних систем, розглядається як вимушений коливний чи обертовий рух цілого механізму відносно положення рівноваги. Для її опису достатньо використання детермінованих моделей у вигляді періодичних або майже періодичних функцій. Інформативними параметрами сигналу вібрації вважають періоди, амплітуди й фази гармонічних складових функцій.

Оцінки амплітуд вимушених коливань, зумовлених обертанням, дозволяють виявити навіть незначні зміни характеристик технічного стану механічного устаткування, які можуть спричинити аварійну ситуацію в процесі експлуатації

механічних систем. На практиці слід використовувати імовірнісні підходи до задачі аналізу стохастичних складових сигналів вібрацій у вигляді стаціонарних випадкових процесів, що передбачають використання для формування діагностичних ознак усереднених в часі (постійних) характеристик. Фаза вимушеного періодичного збурення в механічній системі вносить певну часову структуру в стохастичні відхилення від ідеальної періодичності, тому випадково модульовані за амплітудою і фазою вібрації є нестаціонарними. Інформація про локальні дефекти, які зароджуються, може бути отримана при аналізі параметрів стохастичної амплітудно-фазової модуляції, оскільки розвиток таких дефектів викликає у вібраційному процесі ріст числа і величини короткотривалих імпульсів, які модулюють амплітуду й фазу вимушених і власних коливань механічної системи. Зокрема, локальні дефекти у вигляді задирів, спричиняють заїдання, схоплення контактуючих поверхонь що призводить до модуляції фази вимушених коливань, а дефекти типу тріщин, викришування, корозії або ерозії поверхонь, призводять до модуляції амплітуди вимушених коливань. Слід зазначити, що в обох випадках характер такої модуляції є стохастичний.

Специфіка об'єктів технічної діагностики, різноманітність задач обробки вимірювальних сигналів роблять неможливим розробку певного “універсального” методу визначення діагностичних ознак, що характеризують технічний стан деталей і вузлів механічних об'єктів. Однак може бути виділений певний клас моделей, який включає в себе відомі представлення, як детерміновані, так і ймовірнісні, що дозволить розробити загальні підходи до їх аналізу. Зокрема, слід виділити використання імовірних моделей у вигляді періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП) і їх узагальнень [1].

У Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України для практичної реалізації ПКВП-підходу по дослідженню технічного стану механічних систем розроблено ряд інформаційно-вимірювальних систем (ВЕКТОР, ПУЛЬС, ЯВІР-70, КОМПАКТ-ВІБРО), які забезпечують проведення широкого комплексу статистичних досліджень сигналів вібрацій методами ПКВП. Діагностичні ознаки в таких системах формуються з використанням імовірнісних характеристик першого та другого порядків. На основі запропонованих ознак можуть бути виявлені дефекти механічних об'єктів на різних, у тому числі ранніх стадіях розвитку.

Створені інформаційно-вимірювальні системи продемонстрували високу ефективність при проведенні діагностичних робіт на підприємствах України. На основі результатів таких досліджень були проведені оцінки технічного стану промислових об'єктів. Зокрема з їх використанням були виявлені і класифіковані дефекти підшипників кочення, ковзання та зубчастих передач.

Ключові слова: вібраційний сигнал, технічний стан, інформаційно-вимірювальна система.

Література

- [1] І. М. Яворський, *Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань*. Львів : Фіз.-мех. ін-т НАН України, 802 с.. 2013.
- [2] І. М. Яворський, Є. П. Почапський, Р. А. Воробель, Б. П. Русин, *Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: довідн. пос. у 8-ми т. [Том 7]: Інформаційні технології неруйнівного контролю*. Львів: Простір-М, 508 с., 2018.
- [3] Н. Г. Шульженко, Ю. Г. Ефремов, П. П. Гонтаровський, “Средства вибродіагностики, оценки термостойкости и ресурса энергетического и транспортного оборудования”, *Вибрация машин: измерение, снижение, защита*, Донецк: ДонГТУ, № 3 (30), с. 40–43, 2012.
- [4] Ю. І. Гижко, М. В. Мислович, “Особливості побудови інформаційно-вимірювальних систем діагностики рухомих частин електротехнічного обладнання”, *Праці інституту електродинаміки Національної академії наук України*, № 2 (17), с. 107–115, 2007.

УДК 519.117.3

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ НЕПЕРЕРВНОГО МОНІТОРИНГУ ОБЕРТОВИХ ВУЗЛІВ

¹⁾Трохим Г.Р., ¹⁾Стецько І.Г., ^{1,2)}Юзефович Р.М.

¹⁾Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, відділ методів і засобів відбору та обробки діагностичних сигналів, Львів, Україна,

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

E-mail: george.trokhym@gmail.com

Основними методами неперервного моніторингу обертових вузлів є методи вібраційної діагностики. Умова неперервності накладає вимоги підвищення вірогідності контролю та швидкості аналізу відповідних вибраному методу параметрів [1]. Задачею моніторингу є виявлення механічних дефектів обертових вузлів на стадії зародження за допомогою ефективних методів обробки відповідних вібраційних сигналів у реальному часі. Зокрема, нами розвивається новий підхід до аналізу прихованих періодичностей першого і другого порядків з використанням всього комплексу кореляційних і спектральних характеристик, побудованого на моделі періодично нестаціонарних випадкових процесів (ПНВП) [2].

Основною функцією неперервного моніторингу є контроль знаходження параметрів вібрацій в допустимих наперед встановлених межах і сигналізація перевищення ними максимально допустимих значень для кожної точки відбору [3]. При досягненні запрограмованих максимально допустимих значень вібрації на систему управління агрегатом передається команда на зупинку та на аварійну сигналізацію.

При перевищенні встановленого робочого значення вібрацій на 25 % формується сигнал попередження. В алгоритмах роботи також передбачаються пускові, періодичні та вибіркові (за командою оператора) режими тестування.

Знаходження параметрів вібрації в зоні допуску визначається автоматично в режимі реального часу, а необхідні висновки про їх біжучу та прогнозовану

зміну в часі отримують у результаті подальшої математичної обробки зареєстрованих реалізацій вібраційних сигналів [4].

Неперервний моніторинг має певні особливості:

- мінімальне втручання засобів відбору в технологічний процес об'єкта моніторингу, що досягається вигідним попереднім розміщенням точок відбору сигналів та прокладенням комунікацій з апаратурою реєстрації;
- попередня визначеність точок відбору сигналів та їхня незмінність, внаслідок чого стає можлива оцінка кореляцій між коротшими відтинками реалізацій вібраційних сигналів;
- використання акселерометрів з максимальними частотними властивостями як самих перетворювачів, так і способів їх кріплення. Це ефективно для фіксації процесів зародження дефектів, оскільки спочатку дефекти проявляються на високих частотах, а потім з розвитком дефекту переносять енергію прояву в сторону низьких частот;
- вибір частотних методів аналізу для реакції на появу дефектів і оцінка часових трендів для прогнозу ресурсу;
- багатоканальна оцінка вібрацій, а саме одночасна реєстрація вібраційних сигналів в різних точках контрольованого устаткування може допомагати встановлювати справжню причину виникнення підвищених рівнів вібрації та оцінювати вплив дефектів на функціонування всього обладнання;
- завдяки неперервності накопичення даних зберігається повна відповідність життєвому циклу оборотних вузлів;
- прикладне програмне забезпечення керує взаємодією між апаратними модулями системи та інформаційними потоками в ній, реалізує алгоритми статистичної обробки вібраційних сигналів, формує інтерфейс користувача, управляє збереженням отриманої інформації та вихідних результатів [5].

Згідно з приведеними особливостями неперервний моніторинг вимагає облаштування існуючого обладнання технічними засобами відбору і аналізу вібраційних сигналів та засобами сигналізації перевищення їх критичних параметрів. Це, в свою чергу, вимагає від експлуатуючих організацій відповідного фінансового та технічного забезпечення впродовж всього життєвого циклу обладнання.

Тому, неперервний моніторинг застосовують переважно на об'єктах підприємств енергетики, нафтової, вугільної і газової промисловості та для важливих вузлів вартісного обладнання відповідальних за експлуатаційну та екологічну безпеку технологічного процесу [6].

Ключові слова: періодично нестаціонарні випадкові сигнали, неперервний вібромоніторинг, обортові вузли.

Література

- [1] І. М. Яворський, *Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань*. Львів : Фіз.-мех. ін-т НАН України, 802 с., 2013.
- [2] І. М. Яворський, Є. П. Почапський, Р. А. Воробель, Б. П. Русин, *Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: довідн. пос. у 8-ми т. [Том 7]: Інформаційні технології неруйнівного контролю*. Львів: Простір-М, 508 с., 2018.
- [3] Г. Р. Трохим, І. Г. Стецько, “Цілісність інформації в системах вібродіагностики та достовірність її відбору”, *Проблеми машиностроєння*, 15 (5–6), с. 21–25, 2012
- [4] А. П. Стахова, Вібраційний контроль обладнання, що обертається, *Національний авіаційний університет*: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/05/186-2.pdf>
- [5] В. П. Бабак, В. С. Берегун, *Апаратно-програмне забезпечення моніторингу об’єктів генерування, транспортування та споживання теплової енергії*. К.: Ін-т технічної теплофізики НАН України, 298 с., 2016.
- [6] Alaa Abdulhady Jaber and Robert Bicker, “The State of the Art in Research into the Condition Monitoring of Industrial Machinery”, *International Journal of Current Engineering and Technology*, Vol. 4, No. 3, pp. 1986–2001. <https://www.researchgate.net/publication/298786843>.

УДК 621.391:519.72

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТРИБОКОРОЗІЇ ПОВЕРХНІ ТІЛ ОБЕРТАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОРЕЛЯЦІЙНОГО АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

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

¹⁾Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, відділ методів і засобів відбору та обробки діагностичних сигналів, Львів, Україна

²⁾Бидгоцька політехніка, інститут телекомунікацій, Бидгощ, Польща

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

E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com

Представлені розширені результати розробки теоретичної моделі фрикційної взаємодії поверхонь тіл, що перебувають в обертвовому русі та експериментальних досліджень цієї взаємодії шляхом аналізу сигналів їх вібрацій. Вібрації при терті виникають за рахунок розвитку корозійних процесів внаслідок наведення напружень у поверхневих шарах, трансформації і механічного видалення захисних пасивних плівок в процесі тертя [1]. Запропоновано використати модель сигналу вібрацій у вигляді періодично корельованого випадкового процесу.

Проведено аналіз параметрів отриманих реалізацій сигналів віброприскорення, обґрунтування методів їх відбору (величини сили навантаження контртіла, динамічного та частотного діапазонів відбору сигналів, тривалості реалізацій та їх повторюваності) для оптимізації застосування методів обробки відповідно до запропонованої моделі, що враховує нестационарний характер сигналу як результат нелінійності та стохастичності процесів розвитку корозійного пошкодження [2].

Експериментальні дослідження проведені з використанням зразків зі сталі 08X18H10T. Поверхні тертя попередньо обробляли до отримання шорсткості

$R_z = 2,5$ мкм, сигнали віброприскорення знімали в процесі взаємодії тіл обертання за прикладання зовнішньої катодної та анодної поляризації.

Показано, що частотні та кореляційні характеристики сигналів, зокрема імовірнісні характеристики другого порядку можуть служити індикаторами зародження і розвитку корозії взаємодіючих поверхонь та використовуватися для діагностування дефектів і моніторингу технічного стану механізмів.

Ключові слова: вібраційний сигнал, трибокорозія, дефект.

Література

- [1] В. А. Винар, В. І. Похмурський, І. М. Зінь, Х. Б. Василів, О. П. Хлопик, “Оцінювання за електродним потенціалом механізму трибокорозії сплаву Д16Т”, *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, № 5, с. 123–128, 2017.
- [2] І. М. Яворський, *Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань*. Львів : Фіз.-мех. ін-т НАН України, 802 с., 2013.

УДК 681.121.833

METHOD FOR DETERMINING THE CONTENT OF AIR PORES IN HARDENED CONCRETE

Zavlka R. T., Krynytskyi O. S.

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

E-mail: miyt@nung.edu.ua

A common type of damage to concrete that occurs during its freezing and then subsequent thawing is explained by trapped air, which can occur there by mixing small particles that were used as auxiliaries during its manufacture.

Air voids in hardened concrete can be classified as trapped air during concrete production. Many trapped air bubbles, which are evenly distributed in the concrete, perform the function of providing the concrete with better resistance to freezing. While the trapped air cavities are much larger in size and chaotically distributed, and therefore have less impact to protect against freezing. Air bubbles can store water supplied from the environment by the capillary method, followed by the formation of ice in them, which can lead to partial destruction of concrete coatings.

To improve airflow and make the concrete stronger, specially designed air traps have been used to ensure that the air used achieves a proper size and spacing throughout the concrete mix. However, due to the unavailability of appropriate equipment and the inherent difficulty in making concrete mixtures, determining the characteristics of air voids in hardened concrete has been a difficult problem for many years.

The authors [1] introduced the concept of the coefficient of air gaps of voids and tried to use the theory of hydraulic pressure to explain the resistance of concrete to freezing. Although such a theory is now generally accepted, it is not accurate enough for calculations and may not be consistent with experimental results.

Therefore, this study proposes a simple technique for determining air cavities, which is carried out as follows by scanning the polished surface using a high-resolution flatbed scanner. Before scanning, the surface is treated with phenolphthalein or other bright dye to fill the voids in this section. Color tones are used to separate phases using Photoshop. The color distribution and analysis of the image obtained in this way can be automated using Matlab.

On the basis of statistical data collected as a result of two-dimensional measurements, it is possible to determine the three-dimensional distribution of air in hardened concrete. Applying the principles of stereology and statistical laws, you can build a "transformation function" for two-dimensional measurements that can be used for input data of the three-dimensional model. The number and size of air cavities in each model are characterized by the estimated distribution of air voids by size.

Keywords: cavity, distribution, transformation, concrete.

References

- [1] T. C. Powers, "The air requirement of frost-resistant concrete," *Proceedings of the Highway Research Board*, 29(29): pp. 184-211, 1949.

УДК 620.179

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Богдан Г. А.

Національний технічний університет України

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

E-mail: bogdangalya@gmail.com

Відомо, що процес виготовлення порошкових матеріалів досить складний та складається з багатьох стадій. Однією з актуальних задач неруйнівного контролю є розробка автоматизованої системи, що дозволяє оцінити зміну фізико-механічних характеристик таких речовин на різних етапах їх виготовлення [1].

Одним з можливих шляхів рішення, є використання в роботі такої системи, ультразвукових методів неруйнівного контролю. Дані методи непрямі, тобто дозволяють оцінити шукану величину за існуючими кореляційними або аналітичними залежностями зі швидкістю поширення ультразвукової хвилі в досліджуваному матеріалі [2]. А отже, для забезпечення достовірності отриманих значень фізико-механічних характеристик багатофазних речовин, необхідно забезпечити точності вимірювання швидкості поширення ультразвукової хвилі (УЗХ) в об'єкті контролю з похибкою, що не перевищує 1 % [3-4].

Для вирішення поставленого завдання була розроблена автоматизована система, структурна схема якої приведена на рис. 1.

Використання блоку ПП дозволило на порядок зменшити методичну і суб'єктивну складові сумарної похибки вимірювання часу проходження УЗХ в

ОК, що описано в роботі [5], а отже і забезпечити умову вимірювання швидкості УЗХ з похибкою меншою за 1 %.

На базі плати збору інформації реалізовано пристрій, який дозволяє одночасно проводити вимірювання часу проходження ультразвукової хвилі в ОК та геометричних параметрів ОК. Даний пристрій реалізує як амплітудний метод вимірювання часу затримки, так і фазовий, забезпечуючи при цьому роботу в широкому частотному діапазоні. Також плата збору інформації здійснює формування зондувального імпульсу та збирання вимірювальної інформації.

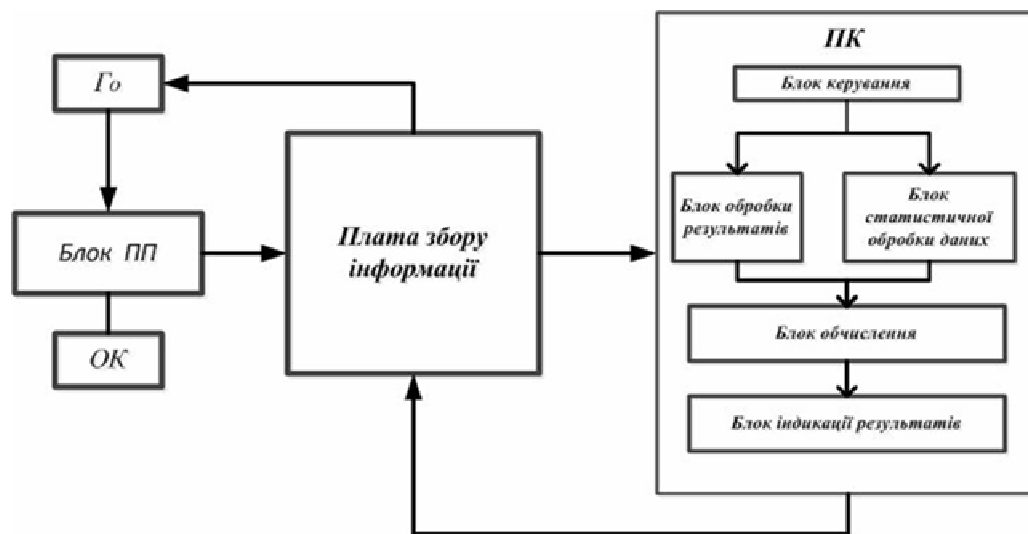


Рис. 1. Структурна схема автоматизованої системи для вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль в порошкових матеріалах

G_0 – високостабільний генератор сигналів частоти дискретизації; ПП – блок фіксації ультразвукових перетворювачів на поверхні ОК; ПК – персональний комп'ютер

Основні технічні параметри системи:

1. Частота зондуючих імпульсів – обирається залежно від матеріалу ОК в межах від 2,5 МГц до 10 МГц.
2. Динамічний діапазон посилення прийомного тракту - 48 дБ.
3. Частота дискретизації - 100 МГц.
4. Розрядність АЦП - 14 біт.

ПК виконує функції: управління та синхронізації роботи всієї системи, обробки результатів вимірювань, математичну та статистичну обробку даних.

Забезпечення спільної роботи розробленої плати збору інформації та комп'ютера, реалізація алгоритмів статистичної та математичної обробки отриманих результатів вимірювань, інформаційне та програмне забезпечення, реалізовано у середовищі розробки та платформи для виконання програм, створеної графічною мовою програмування LabView (National Instruments, USA).

Ключові слова: імпульсний вихрострумний неруйнівний контроль, обвідна, декремент.

Література

- [1] Г. А. Богдан "Вдосконалення ультразвукового методу контролю фізикомеханічних

характеристик порошкових матеріалів”, дис. канд. наук., ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2017.

- [2] Г. А. Богдан, “Источники погрешностей при ультразвуковых измерениях физико-механических характеристик порошковых материалов”, на *XVIII Міжнар. наук.-техн. конф. Приладобудування: стан і перспективи*, Київ, 2019, с. 143-144.
- [3] Г. А. Богдан, М. В. Филиппова, “Лабораторный стенд для высокоточных измерений скорости распространения ультразвуковых волн”, *Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні наук*, Т. 30 (69), № 2, pp. 1-5, 2019.
- [4] Г. А. Богдан, Р. М. Галаган, “Анализ погрешностей измерения скорости распространения ультразвуковой волны в многофазных порошковых материалах. Часть 2: Влияние инструментальной и методической погрешностей”, *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування*, Вип. 51(1), с. 52-57, 2016.
- [5] Г. А. Богдан, Р. М. Галаган, “Дослідження фізико-механічних характеристик багатофазних порошкових матеріалів з використанням ультразвукових методів неруйнівного контролю”, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, № 0115U005689.

UDC 004.89

THE USE OF EFFICIENTNET MODELS IN INFRARED IMAGE CLASSIFICATION

Momot A., Skladchykov I.

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

Infrared cameras have been widely used in numerous fields of industry and technology. Owing to a number of advantages, they enable to enhance significantly the capacity of computer vision technologies. Infrared cameras are currently used in both non-destructive monitoring and warfare. Improving technical recording means and automating infrared images analysis are tasks of urgent importance.

With the rapid development of thermal image technologies, infrared cameras are being increasingly used in safety monitoring assignments. They enable to monitor an object round the clock since the quality of the image does not depend on the time of the day. There has been a prospect to use deep learning models with the purpose of automating data analysis [1]. Using modern convolutional neural networks architectures, it has become possible to significantly reduce the rate of erroneous alert signals. Data mining algorithms considerably increase both detection credibility and efficiency and object classification by infrared cameras.

Mindful of the fast-paced growth of deep learning, there is a major issue of choosing the most efficient model for thermal images analysis. The quality of automated classification is strongly influenced by the physical characteristics of infrared emission. Thermal images tend to have very low heat signature detailing, which makes the task of their classification more complicated compared to visible spectrum images. A deep learning model is supposed to have high adaptability and

generalization properties. It's another major aspect is operation speed. Thus, a neural network must be not only accurate but efficient as well.

In 2019, there was published an article [2] whose authors suggested a method of convolutional neural networks optimization. The formerly known methods had zoomed neural network dimensionality arbitrarily (e.g. by changing the number of layers and neurons). The method suggested in the mentioned above article gradually scales parts of a neural network with a fixed zoom factor. Optimized EfficientNet networks ten times excel state-of-the-art approaches in accuracy with an increase in efficiency, i.e. such networks have fewer parameters and perform faster.

Convolutional neural networks involve three major dimensions: depth, width, and resolution (fig. 1). Depth defines how deep a network is or how many layers there are in it. Width is in fact a number of channels in convolutional layers. Resolution is the dimensionality of an incoming image and card indicators of convolutional layers. Usually, the given parameters were selected by a network developer for each specific task separately. There was no common approach to determining a network scale for a long time. This imposed certain restrictions and led to the need of repeated experiments.

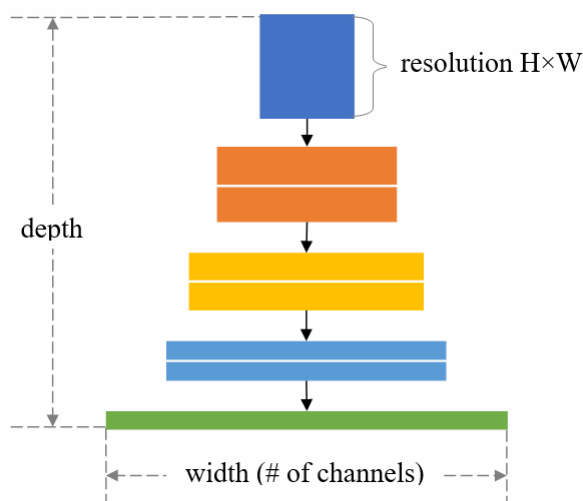


Fig. 1. Deep convolutional network scale

Zooming into a network in any of the dimensions (width, depth, or resolution) may improve accuracy, but when a model is too large, the accuracy improvement is not obvious [3]. Using grid search EfficientNet networks developers changed the settings of an original network with a fixed limit of floating-point operations in a second. These limits defined zoom factors for optimizing the neural network size. As a result, there was obtained a family of EfficientNet B0-B7 streamlined models differing in their scale. EfficientNet B0 models are the simplest and have the fewest number of settings. Each successive model up to B7 is more scaled. In theory, if not rethought, zooming is supposed to improve the network performance accuracy, but have a negative impact on its speed.

In order to define experimentally the performance efficiency of the given infrared camera classification models, EfficientNet B1, B4, and B7 neural networks were

taught. For the experiment, there was used a set of Seek Thermal data containing thermal images of three different classes: an automobile, a man, a cat. The dataset included 6414 300×400 resolution images in total. 5346 images of those were intended for teaching and 1068 – for testing. The image samples of the mentioned classes are shown in figure 2. The texture of the objects is not clear but the temperature of the objects is distinguishable, their edges and contours are also clear.

In order to accelerate the experiment, Transfer Learning was applied. The EffientNet networks used in the experiment had been previously taught on the ImageNet dataset. Fine tuning was also used.

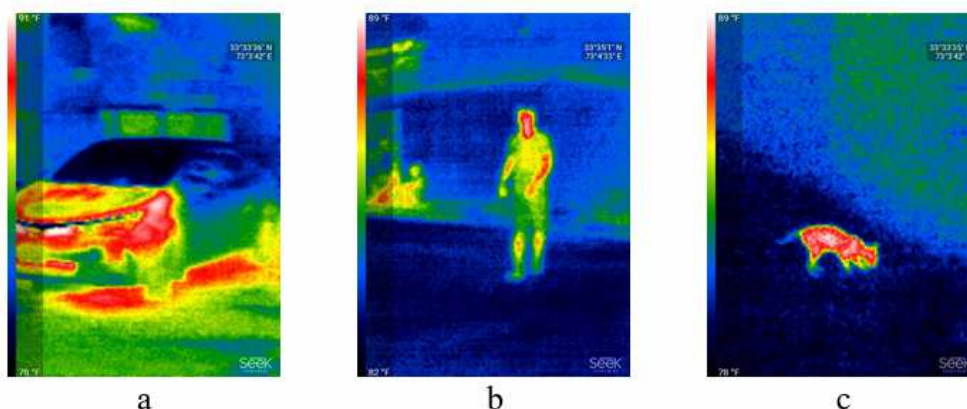


Fig. 2. Image samples from training dataset: a – car, b – man, c - cat

Not only a classifier of 512 neurons was available for training but also the latest convolutional layer of original EffientNet networks. Accuracy was chosen as a metric, Adam – as an optimizer, and categorical cross-entropy – as a loss function. Since many of the training images were of the same type, data augmentation was applied. The results of training are shown in table 1.

Table 1. Evaluation results

<i>Model name</i>	<i>Total parameters</i>	<i>Trainable parameters</i>	<i>Accuracy, %</i>
EfficientNet B7	128 325 018	68 329 731	95.79
EfficientNet B4	62 633 570	46 971 267	97.19
EfficientNet B1	38 689 930	33 141 891	98.50

As one can see from the table, zooming into an EfficientNet network in the given experiment led to over-training, due to which fact the results in the test suite deteriorated. Moreover, along with zooming the total number of network parameters significantly increases, which in turn requires a larger computational burden involved in teaching it to operate. Given the fact that Accuracy decreases, the use of more scaled EfficientNet architectures is not expedient for the given dataset. At the same time, with the help of all three models, one can note infrared camera classification high efficiency. Thus, the given class of models is an effective method of carrying out automated thermal images analysis.

The deep web models studied in the present research are the leading ones in image classification. According to the experiment results, it is recommended to use EfficientNet B1 models in thermographic security control systems. The networks described not only give accurate results but also have an optimized architecture, which markedly increases their performance and speed and reduces the number of settings as well. A perspective task in further research will be efficiency analysis of EfficientDet networks which are EfficientNet derivatives and intended for object detecting on images.

Keywords: deep learning, classification, infrared images.

References

- [1] A. Momot and I. Skladchykov, "Deep learning automated data analysis of security infrared cameras", *Slovak international scientific journal*, vol. 52, pp. 13-16, 2021.
- [2] T. Mingxing and Q. Le, "Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks", in *International Conference on Machine Learning. PMLR*, pp. 6105-6114, 2019.
- [3] B. Koonce, "EfficientNet", *Convolutional Neural Networks with Swift for Tensorflow*, pp. 109-123, 2021.

УДК 620.179.14

ІМПУЛЬСНИЙ ВИХРОСТРУМОВИЙ КОНТРОЛЬ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ БАГАТОЕЛЕМЕНТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Лисенко Ю. Ю. Куц Ю. В., Левченко О. Е.

Національний технічний університет України

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

E-mail: j.lysenko@kpi.ua

Одним з актуальних напрямів розвитку вихрострумowego неруйнівного контролю (ВСНК) є підвищення інформативності контролю за рахунок нових інформаційних ознак. Існуючі на сьогодні засоби ВСНК із імпульсним збудженням вихрострумowego перетворювача (ВСП) використовують такі інформаційні ознаки, як зміщення моменту перетину сигналом певного рівня, часовий інтервал між певними вузловими точками, пікові значення амплітуди та перевищення амплітуди певних порогових значень та моменти цих перетинів тощо [1]. Проте, за умови використання ВСП з імпульсним збудженням в режимі генерування власних коливань [2], існує можливість використання в якості інформаційних параметрів сигналів ВСП їх власної частоти та декременту α . Сигнали ВСП у такому режимі роботи мають характер загасаючих гармонійних коливань (рис. 1).

У процесі контролю значення інформативних параметрів сигналу ВСП змінюються під впливом характеристик та параметрів об'єкта. На рис. 2 зображено сигнали у випадку контролю заготовки зі сталі з різною товщиною діелектричного покриття h : $h=0$, $h=1,62$ мм, $h=4,90$ мм. Значення товщини h є функцією декременту α та описується функцією:

$$\alpha(h) = \frac{1}{\Delta T} \ln \frac{U(t_1, h)}{U(t_2, h)}, \quad (1)$$

де $U(t_1, h)$, $U(t_2, h)$ – значення обвідної в моменти часу t_1 та t_2 , $\Delta T = t_2 - t_1$.

Розглянуте раніше визначення товщини покриття безпосередньо із залежності $h = f(\alpha)$ має певні обмеження – оскільки декремент визначається за певними точками обвідної сигналу $U(t, \alpha)$, отримане значення чутливе до дії шумів, що супроводжують процес визначення сигналу ВСП та його обвідної [3].

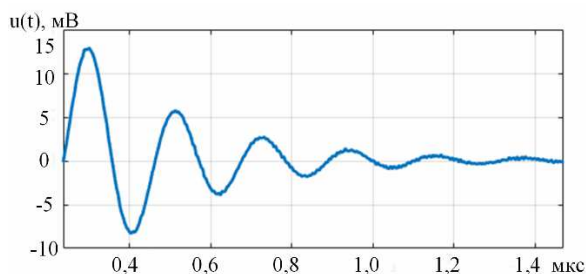


Рис. 1. Фрагмент сигналу ВСП з імпульсним збудженням

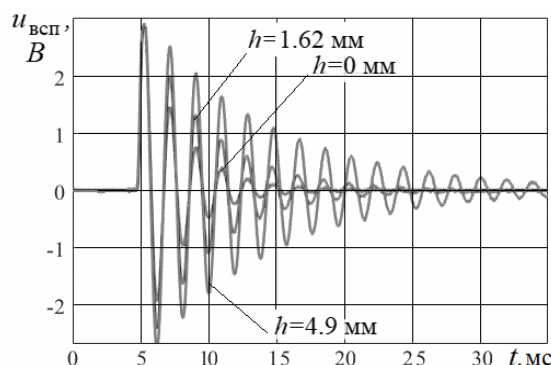


Рис. 2. Графік сигналів ВСП для ОК з різною товщиною діелектричного покриття

У доповіді запропоновано та розглянуто використання для визначення h іншої інформаційної ознаки, яка визначається:

$$h = k \cdot S = k \int_t [U_1(t, \alpha) - U_2(t, 0)] dt, \quad (2)$$

де k – масштабний розмірний коефіцієнт.

Визначення запропонованої ознаки ілюструє рис. 3. Інтегральний характер ознаки дає змогу зменшити дію шумів і на цій основі підвищити точність визначення h .

На рис. 4 наведено структурно-логічну схему імпульсної системи ВСНК визначення товщини діелектричного покриття h . Два ВСП утворюють багатoelementний вихрострумний перетворювач, один з яких використовується для сканування об'єкта контролю (ОК), а інший для – тестового зразка (ТЗ).

Реальний перетворювач в подібній системі ВСНК може мати більшу кількість елементів, тобто містити в собі декілька ВСП. У такому випадку процес опрацювання сигналів передбачає більш складний алгоритм обчислення результату, проте це не вплине на час проведення самого контролю.

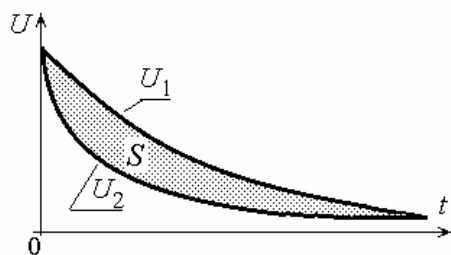


Рис. 3. Графічне зображення інформаційної ознаки S

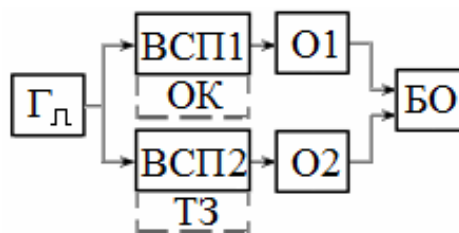


Рис.4. Структура системи ВСК: Г – генератор імпульсів, О – визначник обвідної, БО – блок обчислення

Ключові слова: імпульсний вихрострумний неруйнівний контроль, обвідна, декремент.

Література

- [1] T. Chen, G.Y. Tian, A. Sophian, and P.W. Que, Feature extraction and selection for defect classification of pulsed eddy current NDT, *NDT & E International*, Vol. 41, Iss. 6, pp. 467-476, 2008.
- [2] Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, В. М. Учанін та В. Ф. Петрик, “Дослідження коливального режиму в системах автоматизованого імпульсного вихрострумного контролю”, *Відбір та обробка інформації*, №49 (125), с. 9-18, 2021.
- [3] I. Lysenko, Y. Kuts, A. Protasov, and A. Alexiev, “Optimization of Analysis Time of Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing Signals”, *Int. Jour. “NDT Days”*, vol. 2, iss. 1, pp. 58-63, 2019.

УДК 620.179.14

МЕТОДИ КОЕРЦИТИМЕТРІЇ ФЕРОМАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Рибачук В. Г., Учанін В. М.

Фізико-механічний ін-т ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

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

Вимірювання коерцитивної сили (КС) широко використовують для неруйнівного контролю (НК) широкої номенклатури феромагнітних матеріалів: сталі, чавуни, спечені тверді сплави, литі постійні магніти та деякі інші. Це пов'язано з чутливістю цього магнітного параметру до структури матеріалу та його механічних характеристик. За результатами вимірювань КС здійснюють сортування матеріалів за марками, контролюють твердість, міцність, визначають товщину загартованого або цементованого шару, оцінюють структурну цілісність, якість термічної та хіміко-термічної обробки, а також втомний стан, напружений стан і залишковий ресурс металоконструкцій тощо. Перевагою коерцитиметричного НК є те, що його можна проводити без зняття захисних лакофарбових покриттів [1-5].

Для вимірювання КС застосовують велику номенклатуру приладів, які носять назву коерцитиметрів, коерцитиметрів-структуроскопів або магнітних структуроскопів. Вони відрізняються один від одного тим, що функціонують на основі різних методів вимірювання КС і способів їх технічної реалізації. У

зв'язку з цим важливою є систематизація методів вимірювання КС. Це дозволить обґрунтовано вибирати засіб вимірювання КС у кожному конкретному випадку, виходячи із особливостей об'єкта НК і умов контролю.

За способом отримання чисельного значення КС всі методи її вимірювання розділяються на прямі і непрямі. Перші передбачають повну реалізацію алгоритму вимірювання, який відповідає визначенню КС: спочатку намагнічування зразку феромагнітного матеріалу до стану магнітного насичення, потім його повне розмагнічування магнітним полем протилежної полярності і фіксацію значення напруженості поля розмагнічування, яке відповідає цьому стану. У другому випадку вимірюється магнітний параметр граничної петлі гістерезису, який зв'язаний з КС відомою функціональною залежністю. Зазвичай це залишкова індукція або залишкова намагніченість. Непрямі методи вимірювання КС є значно простіші у реалізації через відсутність операції розмагнічування, але можуть бути застосовані тільки для матеріалів з відомим зв'язком між вимірюваним параметром і КС. За таким принципом працюють, наприклад, коерцитиметр Полус-1 [1], магнітні аналізатори ИМА [1, 2], структуроскоп СИЛА [6].

За способом визначення КС всі методи поділяються на такі, що дозволяють вимірювати КС за індукцією H_{CB} , КС за намагніченістю H_{CL} або КС за залишковою намагніченістю H_{C3} . Між вказаними видами коерцитивної сили існує наступне співвідношення: $H_{CB} < H_{CL} < H_{C3}$ [7]. В НК застосовують тільки два перші методи. КС за залишковою намагніченістю використовується у техніці звукозапису і тому далі розглядатися не буде. Що стосується H_{CB} і H_{CL} , то вимірювання кожного з цих різновидів КС має особливості, які розглядаються нижче.

За співвідношенням розмірів зони контролю, яка визначається об'ємом матеріалу об'єкта контролю (ОК), який перемагнічується, та розмірів ОК в цілому розрізняють інтегральні та локальні методи вимірювання КС. В першому випадку результат вимірювання є усередненим значенням КС ОК в цілому. Такі вимірювання застосовуються стосовно ОК малих розмірів (десятки мм). Локальні вимірювання КС застосовують відносно ОК, розміри яких перевищують кілька десятків мм без обмеження верхньої межі.

За характером магнітного кола, в якому здійснюють процеси намагнічування і розмагнічування ОК або його частини, всі існуючі методи вимірювання КС можна розділити на три групи: вимірювання у відкритому, замкненому або частково замкненому магнітному колі [7].

За способом визначення чисельного значення напруженості поля розмагнічування при проведенні прямих вимірювань КС їх можна поділити на такі, під час реалізації яких ця величина визначається за значенням струму у обмотці котушки розмагнічування і її сталою, і на такі, що передбачають використання спеціальних давачів напруженості магнітного поля, які розміщують у зоні контролю. Для обґрунтованого вибору між цими двома

підходами необхідно враховувати вид КС, яка вимірюється, і характер магнітного кола, в якому вимірювання проводять. Так вимірювання H_{CB} у відкритому магнітному колі повинно обов'язково проводитись за допомогою вимірювача індукції, який розташовано біля поверхні ОК в його середній частині. Якщо ж КС визначається за сталою котушки розмагнічування і значенням струму в її обмотці, то отриманий результат буде значно меншим порівняно зі значенням КС, визначеної в замкненому магнітному колі. Що стосується КС за намагніченістю, то її значення однакове як у замкненому, так і у відкритому магнітному колі і може бути визначене, як за допомогою вимірювачів, які встановлені біля поверхні ОК, так і за сталою котушки розмагнічування [7].

В НК найбільше розповсюдження отримали локальні вимірювання КС у замкненому магнітному колі і інтегральні вимірювання у відкритому магнітному колі. Для реалізації перших використовують коерцитиметри з приставними давачами-електромагнітами на П-подібному осерді. Це, наприклад, магнітні структуроскопи серії КРМ-Ц [5], коерцитиметр ВКС-108 [8] та інші. Що стосується других, то переважно їх застосовують для НК висококоерцитивних виробів із спечених твердих сплавів, для яких характерні малі розміри і різноманітна форма. Намагнічування і розмагнічування таких ОК здійснюють у котушках типу соленоїдів. Прикладом приладів такого призначення є різні модифікації коерцитиметрів типу ВКС і Koerzimat [9]. Застосовують також і локальні вимірювання КС у відкритому магнітному колі за допомогою приставних соленоїдів (метод "точкового полюсу") (коерцитиметри Полюс-1 [1] і ВКС-104 [9]). Їх застосування порівняно з приставними електромагнітами з П-подібним осердям забезпечує кращу локальність вимірювання КС.

За фізичним принципом дії давача магнітного стану ОК, тобто давача сигналу про досягнення ним стану нульової намагніченості (індукції), методи вимірювання КС ділять на індукційні і магнітометричні. Перші передбачають використання давачів, які працюють на основі закону електромагнітної індукції. До них відносяться вібраційний, індукційно-імпульсний (балістичний) способи вимірювання залишкового магнітного поля ОК та спосіб на основі вимірювального генератора [1, 2]. Їх характерною ознакою є наявність механічного руху вимірювальної індукційної котушки, що ускладнює будову приладів і зменшує надійність їх роботи. Тому в сучасних коерцитиметрах для отримання інформації про магнітний стан ОК використовуються магнітометричні давачі. Це переважно ферозонди і давачі Холла.

Представлена класифікація методів вимірювання КС дозволяє проводити оптимальний вибір методу її вимірювання залежно від особливостей ОК і умов проведення НК.

Ключові слова: неруйнівний контроль, феромагнітний матеріал, коерцитивна сила, намагніченість, індукція, магнітне коло.

Література

- [1] А. П. Дегтерев, В. В. Ключев, и В. Е. Щербинин, "Магнитные приборы", в *Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справ. В 2-х кн. Кн. 2*, В. В. Ключев, Ред. Москва: Машиностроение, 1986, с. 6-81.
- [2] В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, и В. В. Сухоруков, *Электромагнитный контроль: Практик. пособие*. В. В. Сухоруков, Ред. Москва: Высшая школа, 1992.
- [3] Г. Я. Безлюдько, и Б. Е. Попов, "Магнитный контроль (по коэрцитивной силе) напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций", на *наук.-техн. конф. Фізичні методи та засоби контролю матеріалів та виробів ЛЕОТЕСТ-98*, Славське Львівської обл., 1998, с. 53-56.
- [4] Г. В. Бида, и А. П. Ничипурук, "Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле", *Дефектоскопия*, № 10, с. 3-28, 2000.
- [5] Г. Я. Безлюдько, "Эксплуатационный контроль усталостного состояния и ресурса металлопродукции неразрушающим магнитным (коэрцитиметрическим) методом", *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, № 2, с. 20-26, 2003.
- [6] И. Г. Соколинская, "О возможности прогнозирования и повышения надежности машин и механизмов по результатам магнитной структуроскопии деталей", *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, № 2, с. 17-20, 2002.
- [7] Н. Е. Февралева, *Магнитотвердые материалы и постоянные магниты. Определение характеристик. Справочник*. Киев: Наукова думка, 1969.
- [8] Г. М. Макаров, Я. М. Рибак, Г. В. Цукорник, В. М. Учанін, та Б. С. Філюшин, "Коэрцитиметр ВКС-108", на *наук.-техн. конф. Фізичні методи та засоби контролю матеріалів та виробів ЛЕОТЕСТ-98*, Славське Львівської обл., 1998, с. 47-48.
- [9] В. Г. Рибачук, "Способы намагничивания при измерении коэрцитивной силы", *Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю*, вип. 9, с. 137-146, 2004.

UDK 535-15

APPLICATION POSSIBILITIES OF INFRARED THERMOGRAPHY IN MEDICAL DIAGNOSTICS

Muraviov O. V.

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

Using of thermal imaging camera is a highly effective and informative means of patients screening for the detection of inflammatory processes in the early disease stages. Nowadays criteria of thermal imaging diagnostics for more than two hundred diseases and pathological conditions are developed and this list is constantly being replenished.

It is known, that various parts of human body have an individual normal average temperature, due to the existence of features in the degree of their blood supply and innervations. However, surface temperature of symmetrical sections for the same areas does not significantly differ normally. Consequently, opposite symmetrical region of the body should be used as a control site for identifying pathologies.

Medical thermography is becoming more widely used every day in multi-disciplinary medical institutions. The work of thermographer during screening

diagnostics takes place, as a rule, in unstable environmental conditions. This determines requirements for medical worker to have a high qualification and special abilities to take into account the influence of external factors, as well as, incomplete thermal adaptation of patients in the diagnostic process [1]. Therefore, one of the pressing issues remains the increase in the information content and the correspondence of the taken indicators to the real temperature of the surface area of the object under observation. Therefore, one of the pressing issues remains the increase in information content and correspondence of taken indicators to real temperature of surface area at observation object. It is worth noting, that diagnosis adequacy also depends on correct interpretation of thermograms, which, in turn, is possible only when a clear image with high quality is obtained. The above parameters largely depend on the operating conditions and influence of environmental factors to thermography camera design.

Today, thermography diagnostics is used in various areas of medicine: oncology, mammalogy, otorhinolaryngology, cardiac surgery, forensic examination and others. One of the most important problems at cardiac surgical interventions is ischemic myocardial damage, since normal coronary perfusion is absent due to aorta clamping. For complete control over the temperature distribution using of infrared cameras is promising and innovative, that allows to get a highly informative image of temperature distribution on entire heart surface [2, 3].

Temperature fluctuations on myocardium surface in study area are clearly defined during hypothermia and hyperthermia under conditions of cardiopulmonary bypass. Exact temperature control of cooling and heating for brain and heart tissues minimizes cardiopulmonary bypass time and provides maximum protection of myocardium during surgery manipulation.

Temperature lowering of the heart and brain from +36 °C to +18 °C is the main factor in protecting against brain hypoxic damage when these organs are turned off from blood circulation during open heart surgery. During warming at the initial stage temperature difference between heat transfer agent and human body should not exceed 5 °C. At other stages of patient warming until 36 °C, the temperature gradient should not exceed 8 °C and heat transfer agent temperature should be strictly maintained in range of 39,0-39,5 °C [4, 5]. Consequently, during such operations high-precision temperature control is necessary, both for the heat carrier and patient.

Thermal imaging cameras use two wavelength ranges of the optical spectrum that correspond to atmospheric transparency windows: 3-5 micrometers or 8-14 micrometers. However, in the case of medical thermography choice of spectral range is not solely due to requirements of atmosphere transparency, since measurement object (human) is situated close to the camera and level of infrared radiation absorption by air is significant less [6, 7]. At the same time, it was found that thermography cameras operating in spectral range of 3-5 μm are more sensitive to reflexes of skin reradiation from thermal radiation external sources. Considering that the maximum spectral intensity of human body radiation with temperature of 37 °C is

approximately at 9.3 μm [8] and the influence of spurious backgrounds is less significant in range of 8-14 μm , it is advisable focusing at photodetector nodes design for medical thermal imagers of this spectral range.

Keywords: infrared imaging camera, medical heat vision, open heart surgery, thermography diagnostics, thermogram analysis.

References

- [1] К. М. Ставоровский, "Автоматична діагностика та аналіз термограмм в медичній практиці", *ElectronComm*, vol. 19, № 1 (78), с. 47-55, 2014.
- [2] А. В. Живкович, А. В. Муравьев, "Современные технологии бесконтактного измерения температуры", в *Материалы XVI Международной научно-практической конференции «Динамика научных исследований - 2020»*, vol. 7, с. 110-115, 2020.
- [3] О. О. Назарчук, О. В. Муравйов, "Компенсація терморозфокусування оптичної системи термографа", *Біомедична інженерія*, № 5, с. 66-67, 2017.
- [4] Zhong-Shan Deng, Jing Liu, "Enhancement of thermal diagnostics on tumors underneath the skin by induced evaporation", in *Proc. of the 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference*, Shanghai, pp. 7525-7528, 2005.
- [5] О. К. Кучеренко, О. В. Муравйов, В. М. Тягур, "Ахроматизація та атермалізація об'єктів інфрачервоної техніки", *Наукові вісті НТУУ „КПІ”*, № 5, с. 114-117, 2012.
- [6] В. Г. Баженов, Г. А. Богдан, М. В. Кравченко, "Цифровая система измерения фазовых сдвигов радиоимпульсных сигналов", *Международный научно-исследовательский журнал*, №4 (46), часть 2, с. 36-38, 2016.
- [7] О. К. Кучеренко, А. В. Муравьев, "Методы пассивной атермализации и ахроматизации двухкомпонентных оптических систем", *Вісник НТУУ «КПІ»*, Серія приладобудування, Вип. 43, с. 46-53, 2012.
- [8] А. В. Муравьев, "Основные тенденции, проблемы и перспективы развития дисплейной наноэлектроники", на *Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському союзі: матеріали 2-гої науково-технічної конференції з міжнародною участю*, Польща, Люблін, с. 10-11, 2018.

UDK 535.317

COMPENSATION OF ENVIRONMENT TEMPERATURE INFLUENCE FOR MEDICAL THERMAL IMAGING CAMERA

Muraviov O. V.

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

Heat images of the body surface allow to analyze deviation from the norm and pathological situation in the organism. In particular, medical thermography is used for cancer diagnosis, traumas, inflammatory processes [1, 2]. The informativeness of thermogram analysis is primarily based on contrast and quality of the image obtained, which in turn depend from ambient temperature during diagnosis. Separately, the infrared lenses of thermography system is significantly affected by the temperature, whose image characteristics can be significantly impaired by temperature change, which will result in a loss of resolution. On this basis, one of the important tasks in

lenses design of infrared devices is preservation of their basic characteristics during temperature fluctuations inside the system.

Medical heat vision is a contactless, rapid and non-invasive means of diagnosis for many known diseases. The method allows to observe in dynamic and control the effectiveness of treatment, healing of wounds at different stages of morphogenesis and also prevent the possible development of complications [3]. Thermograph using is a highly effective and informative means of patients screening for the detection of inflammatory processes in the early disease stages. To date, the criteria of thermal imaging diagnostics for more than two hundred diseases and pathological conditions are developed and this list is constantly being replenished.

At analyzing thermogram information and setting the diagnosis, there are certain rules and regularities. For example, registered temperature difference of 1-2°C on oppositely symmetrical body parts indicates presence of the organism pathology. In particular, at tumors the temperature change to greater side indicates malignant degeneration and to lesser side indicates benign nature of the tumor [4].

Temperature fluctuations of the environment during the infrared technique operation significantly affect to its characteristics, such as quality and informativeness of the thermogram, so at the design stage of such high-precision and sensitive devices it is expediently to carry out an athermalization of the optical system [5]. In the process of dioptric objectives synthesizing, which include several components, it is possible to select materials for the purpose of system self-athermalization, simultaneously to perform the achromatization of the optical system and to minimize those image aberrations, on which highest requirements are subjected. To perform above tasks, such as thermostabilization and characteristics improvement of the thermograph objectives, at calculating stage of the optical system parameters of the infrared device it is advisable to use passive optical athermalization method. The method algorithm involves the using at the lenses design several infrared materials with different magnitudes and signs of thermo-optical constants in combination with certain material of supporting structure [6].

Synthesized on base of passive optical athermalization infrared objectives with thermostabilized value of back focal length of the optical system maintain the stability of frequency and energy characteristics and keep high image quality in the operating temperatures range [7].

Medical thermal vision most successfully combines effective pathology search and absolute non-invasiveness for patient and medical staff. Diagnosis reliability is based on stability of thermal imaging symptoms, main parameter of which is the consistency and predictability of changes in relative temperatures. This allows successful using of thermography cameras as a method of objective control over the pathological processes in the body for various fields of medical practice.

Actual problem of modern medical thermography is change of system image quality under the influence of environmental factors. The most significant to the temperature effects are the characteristics of germanium lenses, which are the most widespread nowadays. Change of image quality under the action of temperature

fields is due to high temperature dependence of optical and mechanical properties of the material.

Improvements of thermal imaging technology must be focus on image quality increasing of thermograms and developing algorithms for automatic diagnosis of diseases and pathologies. Further scientific researches should be carried out in direction of determining the radiation spectra of different parts and tissues of human body in order to detect wavelengths of maximum and minimum of their spectral intensity. This will enable the implementation of multilayer thermographic diagnostics, which in turn will allow to obtain a clear infrared image of human organism areas that will be of direct interest to the doctor or researcher.

Keywords: athermalization, image quality, medical thermography camera, thermal stabilization, infrared lenses.

References

- [1] Г. Р. Иваницкий, "Современное матричное тепловидение в биомедицине", *Успехи физических наук*, т. 176, № 12, с. 1294-1320, 2006.
- [2] О. О. Назарчук, О. В. Муравйов, "Компенсация терморозфокусирования оптической системы термографа", *Биомедицина инженерия*, № 5, с. 66-67, 2017.
- [3] А. В. Живкович, А. В. Муравьев, "Современные технологии бесконтактного измерения температуры", в *Материалы XVI Международной научно-практической конференции «Динамика научных исследований - 2020»*, Vol. 7, с. 110-115, 2020.
- [4] А. Г. Шушарин, В. В. Морозов, М. П. Половинка, "Медицинское тепловидение – современные возможности метода", *Современные проблемы науки и образования*, №4, с. 1-18, 2011.
- [5] О. К. Кучеренко, А. В. Муравьев, "Методы пассивной атермализации и ахроматизации двухкомпонентных оптических систем", *Вісник НТУУ «КПІ»*, Серія приладобудування, Вип. 43, с. 46-53, 2012.
- [6] А. В. Муравьев, О. К. Кучеренко, "Композиции атермализованных трехкомпонентных инфракрасных объективов", *Наука и техника*, № 4, с. 32-37, 2015.
- [7] А. В. Муравьев, Е. А. Назарчук, "Термостабилизация качества изображения оптической системы термографа", *Вісник інженерної академії України*, № 4, с. 195-199, 2016.

UDK 535.317

THERMAL STABILIZATION TECHNIQUE FOR IMAGE QUALITY OF INFRARED LENSES

Muraviov O. V.

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

The infrared (IR) equipment gets wide application in metrology, military enginery, scientific researches. IR devices are often used in difficult environmental conditions. A number of scientific publications are devoted to the design of thermally independent lenses. For example, in [1] methods of opto-mechanical passive athermalization of optical systems are considered. However, far too little attention has been paid to the passive optical athermalization algorithm. The analysis of such

publications shows that the greatest attention is paid to opto-mechanical methods of athermalization, while passive optical athermalization is nowadays increasingly used due to a number of advantages: simplicity of construction, high accuracy and reliability, reduction of mass and dimensional characteristics. In particular, the significant advantage of optical methods is when the contribution of mechanical structural members to thermal defocusing can be minimized by applying materials with negligible temperature coefficient of linear expansion for mechanical parts of optical devices. Currently, there are only general recommendations that can be used in design of athermalized lenses, while the question of mathematical algorithms for passive optical athermalization remains open.

At lenses design process for IR equipment, developers widely use three-component optical systems. These systems allow to get good image quality without using aspherical surfaces. At the same time, the task of maintaining image quality over a wide temperature range in most of these compositions remains unresolved. This paper material is devoted to development of mathematical apparatus that allows to design athermalized and achromatic IR triplets with possibility of minimization of necessary image aberrations for the case of uniform temperature distribution in optical system [2].

Operating requirements for such equipment often include provision of the working temperature range ± 50 °C, because the most significant environmental factor that influences to image quality of IR technique is the temperature field change [3]. This leads to the emergence of thermal defocusing in the optical system – change of the back focal length size, and image thermal aberrations. As a result, there is a significant reduction of the resolution and deterioration of lenses main characteristics. Consequently thermal stabilization of lens image quality at the environmental temperature changes is an important and actual problem that needs to be solved at the design stage of IR device.

The question of thermal stabilization can be solved by applying active, semi-active and passive methods. Main advantages of passive optical athermalization are high reliability, absence of any moving parts and need of manual adjustment, minimization of weight and size properties and simplicity of design. Perspectives of this direction development are also caused by constant expansion of the optical materials list for IR spectral range [4].

The synthesis of an athermalized dioptric objective is based on optical materials combinations with different signs of the thermo-optical constant. During thermal stabilization it is possible to minimize image aberrations and to choose optimal material of the supporting structure for lenses at the same time. Proposed method allows to synthesize athermalized IR objectives, which include two or three lenses, using only two different optical materials [5, 6].

Temperature fluctuations of the environment during the infrared technique operation significantly affect to its characteristics, such as quality and informativeness of the image, so at the design stage of high-precision and sensitive devices it is expediently to carry out an athermalization of the optical system. Athermalization and achromatization of IR triplets can be carried out by selection of

optical materials compositions. During athermalization the main aberrations of IR dioptric lenses image are also minimized.

Synthesized in accordance with developed technique IR triplet with 50 mm focal length, 1:1 relative aperture, field of view angle 12° is characterized in the temperature range from -20°C to + 60°C by 4 μm changing of back focal length, that is 1-2 orders less than for non-athermalized lenses with similar operational parameters [7].

Further work in this direction should aim to improve design techniques of achromatic and athermalized infrared optical systems in order to get an algorithm that will allow to obtain a complete design parameters set for optical system without requirement of additional optimization; to minimize optical system aberrations; to design optical systems consisting of more than three components.

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

References

- [1] J. Tejada, "Passive athermalization: maintaining uniform temperature fluctuations", *Optical Design*, May, pp. 341-345, 2006.
- [2] О. К. Кучеренко, А. В. Муравьев, "Методы пассивной атермализации и ахроматизации двухкомпонентных оптических систем", *Вісник НТУУ «КПІ»*, Серія приладобудування, Вип. 43, с. 46-53, 2012.
- [3] О. О. Назарчук, О. В. Муравйов, "Компенсація терморозфокусування оптичної системи термографа", *Біомедична інженерія*, № 5, с. 66-67, 2017.
- [4] А. В. Живкович, А. В. Муравьев, "Современные технологии бесконтактного измерения температуры", в *Материалы XVI Международной научно-практической конференции «Динамика научных исследований - 2020»*, vol. 7, с. 110-115, 2020.
- [5] О. К. Кучеренко, О. В. Муравйов, В. М. Тягур, "Ахроматизація та атермалізація об'єктів інфрачервоної техніки", *Наукові вісті НТУУ „КПІ”*, № 5, с. 114-117, 2012.
- [6] Russell M. Hudyma, "Athermal MWIR objectives", *SPIE*, vol. 2540, pp. 229-235, 1995.
- [7] А. В. Муравьев, О. К. Кучеренко, "Композиции атермализованных трехкомпонентных инфракрасных объективов", *Наука и техника*, № 4, с. 32-37, 2015.

УДК 620.179.16, 004.89

РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ ОБРОБКИ ДАНИХ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ОБЕРНЕНИХ ЗАДАЧ

Галаган Р. М.

Національний технічний університет України

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

E-mail: r.galagan@kpi.ua

Для того, щоб ефективно вирішувати обернені задачі ультразвукового неруйнівного контролю, необхідно виконати аналіз як методів цифрової обробки даних, які отримують у результаті дефектоскопії, так і алгоритмів для їх розв'язування. Важливість такого попереднього аналізу, виокремлення найбільш перспективних алгоритмів та синтезу висновків показана у роботі [1]

на прикладі теплового неруйнівного контролю. Завдяки цьому значно підвищується інформативність та достовірність контролю.

Результати ультразвукового неруйнівного контролю зазвичай представлені у вигляді розгортки, яка називається А-скан і є графіком залежності амплітуди прийнятих сигналів від часу (відстані) у декартовій системі координат. Часто такі сигнали містять високі за рівнем шуми та завади, що обумовлюють виникнення похибок [2]. Внаслідок цього ускладнюється, а у деяких випадках навіть унеможлиблюється, розв’язок оберненої задачі, оскільки розв’язок із зашумленими або некоректними вхідними даними може сильно відрізнятися від точного рішення.

Для розв’язку оберненої задачі необхідно точно оцінити такі параметри сигналу, як амплітуда, фаза, частота, форма обвідної тощо. Саме в них може міститись необхідна інформація, щоб визначити розмір та істинну форму (а не еквівалентну у вигляді плоскодонного отвору, як це робиться зараз у класичній ультразвуковій дефектоскопії). Тому попередня обробка даних є вкрай важливою і на сьогоднішній день це вирішена задача.

Невирішеним залишається питання вибору алгоритмів для розв’язування обернених задач та налаштування цих алгоритмів під конкретні завдання ультразвукової дефектоскопії. Необхідно виконати порівняння класичних математичних алгоритмів, методів статистичного аналізу та нейромережових технологій, з’ясувати не лише їх ефективність, а й затрати на реалізацію.

Ключові слова: ультразвук, дефектоскопія, цифрова обробка даних, алгоритми.

Література

- [1] R. Galagan and A. Momot, “Analysis of methods for digital processing of thermograms”, *Visnik Nacionalnogo Tehnichnogo Universitetu Ukrayini “KPI”. Seriya Priladobuduvannya*, no. 55, pp. 108—117, 2018. doi: 10.20535/1970.55(1).2018.135849
- [2] Р. М. Галаган, Г. А. Богдан, «Анализ погрешностей измерения скорости распространения ультразвуковой волны в многофазных порошковых материалах. Часть 2: влияние инструментальной и методической погрешностей», *Вісник Національного Технічного Університету України «КПІ»*. Серія приладобудування, Вип. 51(1), с. 52-57, 2016.

УДК 620.179.14:539.4

ОСОБЛИВОСТІ ЗМІНИ ФАЗИ СИГНАЛУ МАГНІТОАНІЗОТРОПНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПІД ЧАС ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ ЗВАРЮВАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ

¹⁾Мінаков С. М., ²⁾Учанін В. М.

¹⁾ Національний технічний університет України

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

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

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

Залишкові зварювальні напруження (ЗЗН) є одним із факторів, що визначають роботоспроможність зварних конструкцій (ЗК), тому їх визначення неруйнівними методами є надзвичайно актуальним завданням. Розрахункові

методи через низку обмежень не завжди дозволяють визначити робочі і залишкові напруження конкретної ЗК в реальних умовах.

Для визначення механічних напружень конструкцій із феромагнітних сталей широко використовують методи, побудовані на магнітопружному ефекті. Визначення ЗЗН на відміну від робочих напружень має свої особливості через наявність зони термічного впливу, зони залишкових пластичних деформацій та зони литого шва. Для визначення ЗЗН нами запропоновано використовувати магнітоанізотропні вихрострумові перетворювачі (МВСП) подвійного диференціювання, які на відміну від попередніх розробок дозволяють контролювати на робочих частотах вище 1 кГц, що суттєво розширює можливості методу.

Зазначені вище особливості ЗЗН призводять до зростання похибок вимірювання ЗЗН. Для дослідження МВСП створено експериментальну установку, яка складається з звукового генератора, МВСП, АЦП і комп'ютера. Амплітуду та фазу сигналу МВСП розраховували за допомогою спеціальної програми. Одночасно проводили визначення ЗЗН приладом для магнітоанізотропного контролю типу MESTR-411, в якому реалізовано амплітудно-фазовий метод. Вимірювання проводили у перерізах кільцевих та поздовжніх швів зварної труби діаметром 520 мм. У результаті визначено, що зміна фази сигналу МВСП під час переходу з зони стиску на зону розтягу зварного шва визначається не тільки зміною характеру напружень, а і зміною структурного стану металу. Це призводить до зменшення амплітуди сигналу приладу MESTR-411 у пластичній зоні та збільшення її в зонах розтягу.

Проведені дослідження показали, що достовірне визначення ЗЗН можливе на основі роздільного вимірювання амплітуди та фази сигналу МВСП. Це дозволяє за амплітудою сигналу визначати величину ЗЗН, а їх характер (стиск або розтяг) – за фазою сигналу МВСП.

Ключові слова: зварювальні напруження, магнітоанізотропний перетворювач, фаза, амплітуда.

УДК 620.179.14

АВТОГЕНЕРАТОРНИЙ ВИХРОСТРУМОВИЙ ДЕФЕКТОСКОП З АВТОМАТИЧНИМ НАЛАШТУВАННЯМ НА ЗАДАНИЙ ОПЕРАТОРОМ РІВЕНЬ ЧУТЛИВОСТІ

¹⁾Учанін В. М., ¹⁾Алещенко О. Г., ²⁾Дереча В. Я.

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

²⁾ДП «АНТОНОВ», Київ, Україна

E-mail: vuchanin@gmail.com

Однією з причин порушень аварійних руйнувань літаків в експлуатації є зародження та розвиток втомних тріщин. Періодичний неруйнівний контроль

авіаційних конструкцій (АК) на всіх етапах їх життєвого циклу є надважливим фактором забезпечення їх безпечної експлуатації [1, 2]. Достовірність вихрострумової дефектоскопії АК суттєво залежить від кваліфікації і досвідченості оператора. Суттєво зменшити цей вплив можна шляхом введення операції автоматичного налаштування вихрострумових дефектоскопів (ВД) з реалізацією заданого методикою контролю рівня чутливості.

Для виявлення дефектів в авіаційній галузі використовують автогенераторні ВД типу ЛЕОТЕСТ ВД, які пройшли державні випробування і включені в регламент з технічного обслуговування літаків ДП «АНТОНОВ» і авіаційних двигунів [1, 2]. У ВД використано параметричні вихрострумові перетворювачі (ВСП), що мають високу чутливість до коротких тріщин завдовжки більше 1 мм [3]. Для побудови автогенераторного ВД використано схему двоконтурного автогенератора (АГ) на польовому транзисторі з ізольованим затвором, який працює в режимі переривчастих коливань, коли інформаційним параметром є частота проходження пачок високочастотних коливань, що дозволило повністю заглушити вплив зміни зазору між ВСП і поверхнею об'єкта контролю (ОК) (патент України № 39207) [4]. Для відстроювання від змін зазору реалізовано закритичний режим, коли реальні складові внесеного імпедансу, обумовлені дефектом і зазором, мають різний знак. Використано також ефективну схему регенерації коливань АГ і схему електронного керування його частотою за допомогою варикапу [5,6].

На рис. 1 подано характеристики двоконтурної коливальної системи АГ під час розміщення ВСП у «повітрі» за найбільшого значення ємності варикапу (○) та під час розміщення ВСП на бездефектній частині ОК із алюмінієвого сплаву за найбільших (▼) і найменших значень (▲) ємності варикапу. Зближення максимумів характеристики (рис. 1) за найбільших значень ємності варикапу сприяє генерації АГ під час настроювання. Відстань між максимумами визначає чутливість до змін імпедансу ВСП під впливом дефекту.

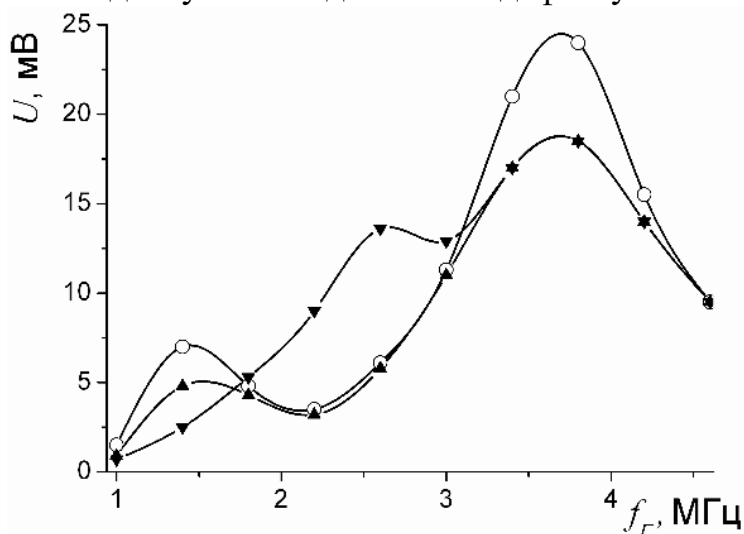


Рис. 1. Амплітудно-частотні характеристики коливальної системи автогенератора ВД

Практика показала, що аналогова частина ВД є достатньо ефективною і може бути взята за основу вдосконаленого приладу. В той же час, актуальним є вдосконалення ВД шляхом 1) введення схеми автоматичного налаштування ВД з процесорним керуванням режимом роботи автогенератора і 2) введення індикатора встановленої (або заданої методикою контролю) чутливості. Відсутність таких можливостей в існуючих ВД суттєво зменшує достовірність і повторюваність результатів ВК, особливо за його проведенні операторами різної кваліфікації. В результаті запропоновано концепцію побудови автогенераторного ВД з автоматичним налаштуванням і додатковою індикацією чутливості (рис. 2).

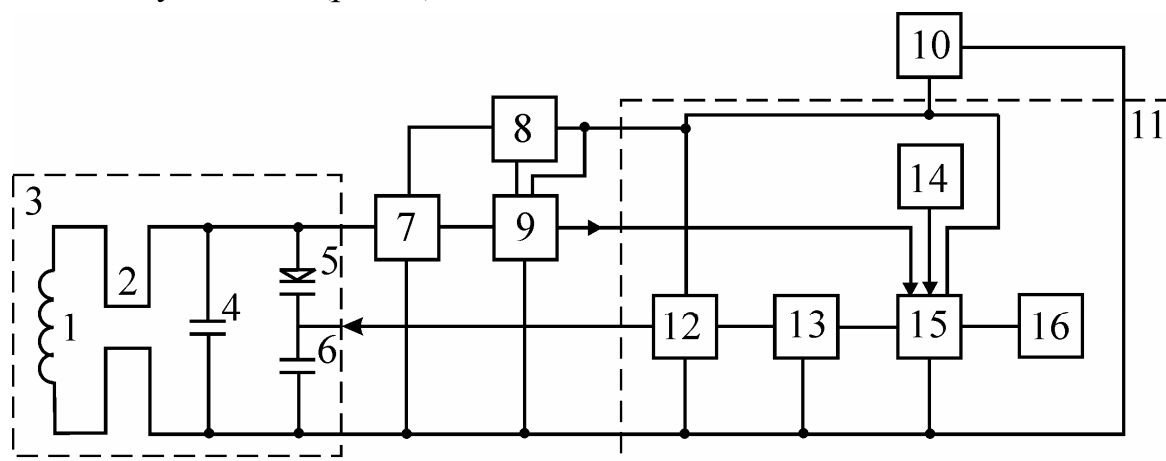


Рис. 2. Функціональна схема вдосконаленого автогенераторного ВД

Вдосконалений ВД (рис. 2) складається з наступних елементів: 1 – обмотка ВСП; 2 – кабель довжиною 1-2 м; 3 – конденсатор робочого коливального контуру; 4 – конденсатор опорного контуру; 5 – варикап; 6 – розділювальний конденсатор; 7 – активний елемент АГ; 8 – блок регенерації коливань АГ; 9 – блок індикації дефекту; 10 – блок живлення; 11 – керований подільник напруги; 12 – підсилювач; 13 – ЦАП; 14 – кнопка запуску процедури налаштування; 15 – процесор; 16 – індикатор чутливості. Таким чином додатково введено керований подільник напруги 11, який складається з ЦАП 13, кнопки запуску процедури налаштування 14 і процесора 15, та індикатор чутливості 16. Формування напруги керування на виході ЦАП 13 за допомогою варикапу 5 в робочому контурі автогенератора, здійснюється за допомогою процесора 15, який запускається натисканням кнопки запуску процедури налаштування 14. Індикатор чутливості 16 показує різницю між напругою спрацювання індикатора дефекту 9 на виході ЦАП 13 під час налаштування і по закінченні процесу налаштування, яка визначає чутливість до дефектів. Дефектоскоп забезпечує можливість точного відтворення рівня чутливості, який прописано в методиці контролю, незалежно від кваліфікації оператора. Детальніша інформація про автогенераторні ВД та їх використання подана в наведених нижче публікаціях.

Ключові слова: вихрострумний дефектоскоп, автогенератор, переривчасті коливання, авіаційна конструкція, тріщина

Література

- [1] В. Учанин, В. Дереча, “Вихретоковый метод выявления поверхностных дефектов узлов авиационной техники в условиях эксплуатации,” *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, № 4, с. 20-28, 2006.
- [2] В. Учанин, С. Александров, В. Цыганов, “Вихретоковая дефектоскопия деталей авиационных двигателей в условиях эксплуатации и ремонта,” *Вісник двигунобудування*, 2, с. 151-155, 2009.
- [3] В. Учанин, “Оптимізація конструкції вихрострумного перетворювача параметричного типу для виявлення поверхневих тріщин,” *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 1, 2022.
- [4] В. Учанин, “Автогенераторные вихретоковые дефектоскопы: основные принципы, классификация, сравнительный анализ (Обзор),” *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, с. 18-23, 2010.
- [5] В. Учанин, “Аналіз роботи двохконтурного автогенераторного вихрострумного дефектоскопа в режимі переривчастої генерації,” *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 2, 2022
- [6] V. Uchanin, “Enhanced eddy current techniques for detection of surface-breaking cracks in aircraft structures,” *Transactions on Aerospace research*, 1(262), pp. 1-14, 2021.

УДК 620.179.14

ВИХРОСТРУМОВИЙ КОНТРОЛЬ АНІЗОТРОПНИХ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

Рибачук В. Г., Учанин В. М., Кулинич Я. П.

Фізико-механічний ін-т ім. Г.В. Карпенко НАН України, Львів, Україна

E-mail: vgrybachuk@gmail.com, vuchanin@gmail.com, yar.kulynych@gmail.com

Питома електропровідність (ПЕП) є одним із найважливіших фізичних параметрів, який характеризує здатність речовин, матеріалів та середовищ проводити електричний струм. На даний час вона є єдиним параметром на основі вимірювань якого функціонують засоби вихрострумової структуроскопії неферромагнітних матеріалів. При теоретичному аналізі вихрострумних засобів вимірювання ПЕП передбачається, що матеріал об'єкта контролю є ізотропним. Хоча, в дійсності, переважно всі конструкційні матеріали є у тій чи іншій мірі анізотропними за своїми фізичними властивостями. Це стосується також і ПЕП. Фактори, які викликають анізотропію ПЕП можуть бути різні. Це і деформації внаслідок дії механічних навантажень, механічні напруження, у тому числі залишкові, анізотропія механічних властивостей матеріалів, а також текстурні особливості матеріалу. Ступінь анізотропії ПЕП конструкційних матеріалів може змінюватися в широких межах. Для алюмінієвих сплавів максимальна відносна різниця ПЕП вздовж головних осей анізотропії становить трохи менше 0,04 [1]. Водночас у вуглеволокнистих композитних матеріалів співвідношення ПЕП у різних напрямках може відрізнятися більш ніж на порядок [2]. Тому в

загальному випадку ПЕП є не скалярною, а тензорною величиною. У зв'язку з цим постає проблема кількісного опису електропровідних властивостей анізотропних матеріалів. У доповіді розглядаються можливі способи її вирішення.

Перш ніж перейти до їх розгляду необхідно відмітити деякі особливості прояву анізотропії ПЕП у вихрострумовому контролі. Вони пов'язані з тим, що вихрові струми протікають у відносно тонкому поверхневому шарі матеріалу по замкненим контурам, площини яких паралельні до поверхні матеріалу. У напрямку перпендикулярному до поверхні струми відсутні. Тому в даному випадку анізотропність матеріалу проявляється у вигляді одновісної анізотропії. Її описують двома значеннями ПЕП вздовж головних осей анізотропії, які є взаємно перпендикулярні та паралельні поверхні матеріалу [3].

Перший спосіб опису анізотропії ПЕП у вихрострумовому контролі полягає у вимірюванні значень ПЕП вздовж головних осей анізотропії з використанням лінійно-протяжних вихрострумових перетворювачів (ВСП). Обмотки таких ВСП мають форму прямокутних петель видовжених в одному напрямку. Чим більшим є відношення довгої і короткої сторін такого перетворювача, тим точніше він дозволяє вимірювати ПЕП вздовж напрямку орієнтації довгої сторони. Даний спосіб опису анізотропних властивостей матеріалу має максимально повний характер, але вимагає одночасно оперувати двома чисельними значеннями ПЕП. Особливістю конструкції лінійно-протяжних ВСП є значні габарити, що ускладнює їх застосування на об'єктах малих розмірів та з криволінійною поверхнею.

Більш простим є другий спосіб, який ґрунтується на представленні анізотропії різницею головних компонент тензора ПЕП. Однак цей параметр залежить не тільки від ступеня анізотропії матеріалу, але також і від абсолютних значень компонент тензора і тому є у більшій мірі якісною характеристикою анізотропії.

Третій спосіб опису анізотропії базується на використанні коефіцієнта анізотропії. Цей коефіцієнт є відносною величиною і не залежить від абсолютних значень ПЕП матеріалу в різних напрямках. Тому він найбільш об'єктивно характеризує ступінь анізотропності матеріалу. Його визначають як відношення значень головних компонент тензора ПЕП або як відношення їх різниці до абсолютного значення однієї із них. В останньому випадку для одновісної анізотропії він має наступний вигляд:

$$\lambda = (\sigma_x - \sigma_y) / \sigma_x, \quad (1)$$

де σ_x і σ_y – ПЕП матеріалу в напрямку головних осей одновісної анізотропії.

Реалізація другого і третього способів представлення анізотропії ПЕП можлива двома шляхами: непрямым і прямим. У першому випадку попередньо необхідно виміряти значення σ_x і σ_y , що, як правило, передбачає використання лінійно-протяжних ВСП. Значно більш ефективним є другий шлях, коли

коефіцієнт анізотропії ПЕП (або різниця головних компонент тензора ПЕП) визначається безпосередньо на основі відповідних інформативних параметрів електромагнітного поля. Дослідженням просторової структури поля вихрових струмів, збуджуваних індукційною котушкою з феритовим осердям циліндричної форми, встановлено, що в якості таких інформативних параметрів можна використовувати різниці амплітуд і фаз радіальної $\dot{H}_r$ і нормальної $\dot{H}_z$ складових цього поля, виміряних на поверхні матеріалу в точках, які знаходяться на однаковій відстані від котушки збудження і рознесених на $\pi/2$ по кутовій координаті θ . Вони описуються наступними виразами:

$$\left. \begin{aligned} \Delta H_r &= \left| \dot{H}_r \right|_{\theta=\pi/2} - \left| \dot{H}_r \right|_{\theta=0}; & \Delta H_z &= \left| \dot{H}_z \right|_{\theta=\pi/2} - \left| \dot{H}_z \right|_{\theta=0} \\ \Delta \varphi_r &= \varphi_r|_{\theta=\pi/2} - \varphi_r|_{\theta=0}; & \Delta \varphi_z &= \varphi_z|_{\theta=\pi/2} - \varphi_z|_{\theta=0} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де φ_r і φ_z – фази відповідно радіальної і нормальної складових вектору магнітної напруженості поля вихрових струмів; відлік кутової координати θ ведеться від координати x , якій відповідає значення головної компоненти σ_x тензора ПЕП.

Встановлено, що вказані інформативні параметри мають пропорційну залежність від коефіцієнта анізотропії λ , який описується формулою (1).

На рис. 1 показано приклад вимірювання коефіцієнта анізотропії λ з вико-

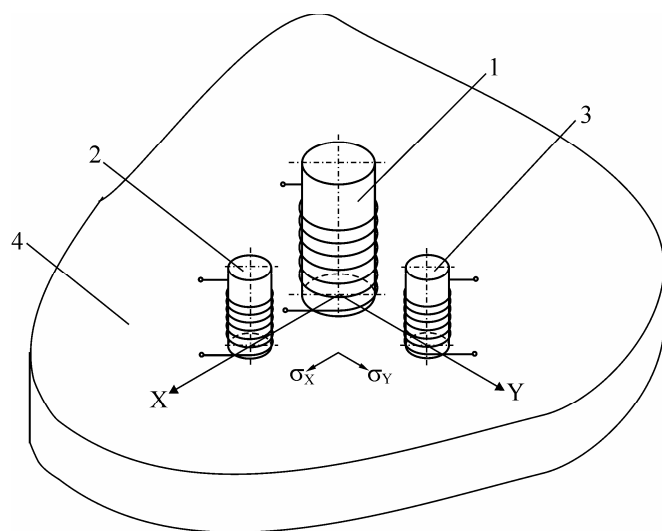


Рис. 1. Вимірювання коефіцієнта анізотропії ПЕП з використанням інформативних параметрів ΔH_z або $\Delta \varphi_z$

ристанням інформативних параметрів ΔH_z або $\Delta \varphi_z$ із виразу (2) [4]. Тут 1 – котушка збудження, 2 і 3 – вимірювальні котушки, 4 – об’єкт контролю, x і y – головні осі анізотропії. Обмотки всіх індуктивних котушок намотані на феритових осердях. Вимірювальні котушки встановлені таким чином, що лінії, які з’єднують їх центри і центр котушки збудження, орієнтовано вздовж головних осей анізотропії. Передбачається, що напрямки головних осей анізотропії відомі. В протилежному випадку необхідно шляхом повороту ВСП навколо поздовжньої осі котушки

збудження для пошуку такого положення, коли використовуваний інформативний параметр сягає максимального значення. При цьому вимірювальні котушки ВСП, займуть положення, які відповідають значенням кутової координати θ рівним $\pi/2$ і 0 , а лінії, які з’єднують їх центри і центр

котушки збудження співпадають з напрямками головних осей анізотропії. При цьому виникає похибка, обумовлена неточним положенням ВСП в момент відліку показів. Вона у значній мірі має суб'єктивний характер і залежить від кваліфікації оператора. У зв'язку з цим актуальною є розробка нових методів визначення коефіцієнта анізотропії ПЕП або інших параметрів, які характеризують анізотропію матеріалів, без необхідності зміни просторової орієнтації ВСП під час вимірювань.

Ключові слова: вихрострумний перетворювач, анізотропія, питома електропровідність

Література

- [1] Н. М. Наумов, и П. Г. Микляев, *Резистометрический неразрушающий контроль алюминиевых деформируемых сплавов*. Москва: Металлургия, 1974.
- [2] H. Lee, O. Galstyan, A. Babajanyan, B. Friedman, G. Berthiau, J. Kim, Do S. Han, and K. Lee, "Characterization of anisotropic electrical conductivity of carbon fiber composite materials by a microwave probe pumping technique", *J. of Composite Materials*, vol. 50, is. 15, pp. 1999-2004, June 2016. doi: 10.1177/0021998315599591.
- [3] М. Г. Савин, *Проблема калибровки Лоренца в анизотропных средах*. Москва: Наука, 1979.
- [4] В. М. Учанин, В. Г. Рибачук, та Я. П. Кулинич, "Вихрострумний спосіб вимірювання параметрів анізотропії електричної провідності неферромагнітних матеріалів", *Пат. України МПК G 01 N27/90, № 138680*, Груд. 10, 2019.

УДК 620.179.14:539.4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ СТУПЕНЮ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ МЕТОДОМ

Мінаков А. С.

Національний технічний університет України

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

E-mail: macabez15@gmail.com

Роботи про дослідженню напруженого стану зварних конструкцій ведуться давно, однак визначення напружень в умовах наявності пластичних деформацій є мало дослідженою проблемою. Відомо, що причиною залишкових зварювальних напружень є залишкові пластичні деформації. Експериментальних методів визначення їх величин дуже бракує, що значно ускладнює оцінку технічного стану інфраструктурних об'єктів. Тому дослідження напруженого стану зварних конструкцій в умовах пластичного деформування є актуальною задачею для промисловості України.

Магнітоанізотропний метод добре застосовується в пружній зоні, однак у зоні з пластичними деформаціями покази падають. І щоб знайти значення пластичної деформації біля зварного шва, було вирішено додати до магнітоанізотропного методу визначення параметрів петлі магнітного гістерезису.

Доцільно застосовувати граничну петлю магнітного гістерезису, як у методі коерцитивної сили, однак такий підхід не дозволяє вільне переміщення перетворювача по зварній конструкції. З метою можливості сканування зварних конструкцій було прийнято рішення використати параметри динамічної петлі магнітного гістерезису при намагнічуванні у полях, менших за насичення (300 А/м).

Дослідження проводили на зразках листової сталі 09Г2С товщиною 4 мм. Визначення пружних та пластичних деформацій проводили тензометричним методом із застосуванням механічних деформометрів. Пластичні деформації розтягу створювали на розробленій установці із застосуванням гідравлічного домкрату на 250 000Н. Пластичні деформації стиснення створювали шляхом температурного деформування зразків. Напруження у попередньо пластично-деформованих зразках наводили шляхом чистого вигину.

Для визначення ступеню пластичного деформування стиснення у пластичній зоні зварних з'єднань електромагнітним методом доцільно використовувати половину перетину петлі гістерезису по осі індукції та половину максимальної ширини петлі гістерезису по осі напруженості магнітного поля.

Для визначення ступеню пластичного деформування у ділянках із пластичними деформаціями розтягу доцільно застосовувати половину максимальної висоти петлі магнітного гістерезису по осі індукції.

Ключові слова: пластична деформація, магнітоанізотропний метод, петля гістерезису, напруження, зварні з'єднання.

UDK 37.013.3

FEATURES OF DISTANCE LEARNING ASSESSMENT

Ameridze O. S.

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

E-mail: ameridze@ukr.net

The emergency transfer of learning to a distance format during a pandemic has significant differences from properly planned online learning.

Of course, the stressful situation for all participants of educational process can't be affected with the attitude towards online learning and other distance learning technologies.

At the same time, the term "online learning" itself is used whenever it is about the lack of face-to-face contact with the teacher, which leads to the substitution of concepts and incorrect conclusions at all.

In the current situation, it would be unreasonable to use the term “online learning” in relation to the use of massive open online courses with well known and created model, because the urgent transfer of students to them in the middle of the semester without prior organizational measures and proper support from the authors

of online courses does not allow students to be fully experienced inside the benefits of this technology.

Understanding the differences between online learning and other existing educational technologies, such as distance learning, blended learning, mobil, etc., allows us to conduct a comparative analysis of the effectiveness of learning in different formats and judge the advantages and disadvantages of a particular technology.

So, what is this educational technology? What determines the effectiveness of online learning? And why should this on-line learning technology be distinguished from distance and blended learning in universities in a pandemic?

In today's digital era, terms such as 'Online Learning' and 'Distance Learning' have become prevalent, with their meanings often interchanged. While both offer a great deal of flexibility to its learner, there are differences between the two.

Distance Learning or Distance Education is a term used to refer to courses that are studied without the need to be physically present at the school, college or university. Distance Learning degrees are available at all academic levels: undergraduate, postgraduate and doctorate. Its origins are college correspondence courses, whereby education materials were post-mailed to the student. The majority – if not all – of the course was learnt through the postal correspondence between the student and the educational institution [3].

For history buffs, the first correspondence course was a shorthand system, taught over postcards. This initiative from the 1840's was the brainchild of Sir Issac Pitman. The antecedent to Online Learning, the term Distance learning is sometimes applied to all degrees not taught on-campus. All Distance Learning courses have an online study component, with access to online learning materials. The key difference is that they also often include face-to-face workshops as a part of the degree programme. As a result, a more suitable term for these types of courses is Part-time, Blended Learning or Flexible Learning degrees.

Online Learning courses are 100% online, providing students an incredible level of flexibility. They can choose where they learn, when they learn and even how they learn. Classes can have live online sessions but are never face-to-face. With Online Learning courses, students have access to a Virtual Learning Environment (VLE) – such as Moodle, Collaborate or Blackboard – hosted with recorded lectures, student resources and e-books. Additionally, students have a University's considerable digital library at their disposal. The VLE acts as a communication medium and interactive learning tool. Discussion forums, group projects and quizzes keep students engaged and encourage peer interaction. Given how much of today's working environment requires facilitation through online correspondence, this medium of study is an excellent way to learn essential communication skills by proxy. A common misconception with Online Learning courses is that students are not provided additional support or academic help to complete the degree [1].

Regardless of study preference one thing is true between Distance Learning and Online Learning: one must be self-disciplined and self-motivated, both very useful skills to cultivate in life.

As the result of the above, in this article we decided to use the term Blended learning since the educational program has not changed and students are required to complete a full-fledged course during the pandemic situation. They should be able to gain theoretical knowledge, as well as the opportunity to use them in practice. Thus, the teaching stuff are faced with the question of assessment these theoretical and practical skills while Blended learning for confirmation of the level of acquired knowledge.

Simply put, assessment is the process of gathering information on what students know based on their educational experience. The results are typically used to identify areas where improvement is needed and ensure that the course content meets learning needs. The common goal of assessment is to evaluate and improve student learning, but the objectives can vary slightly, depending on the type of assessment that's used [2].

There are two basic types of assessment. Formative assessments are used to determine how well a student is learning the material during on going semester period. Summative assessments are sometimes referred to as a final exam and measure what the student has learned after completing a course.

Obviously, assessments are about more than just grades. When meaningful and well-constructed, they help students gear up for success by challenging them to reflect, interact, and apply their knowledge to answer questions, solve problems, and communicate the information.

Keywords: distance learning, knowledge, communicate the information.

References

- [1]. B. Williamson, R. Eynon, J. Potter, “Pandemic politics, pedagogies and practices: Digital technologies and distance education during the coronavirus emergency”, *Learn. Media Technol.*, 45, pp. 107–114, 2020.
- [2]. I. E. Allen, J. Seaman, Digital Compass Learning: Distance Education Enrollment Report 2017. 2017. [Online]. Available: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED580868.pdf>
- [3]. L. Ilyashenko, S. Markova, A. Mironov, O. Vaganova, Z. Smirnova, “Educational environment as a development resource for the learning process”, *Amazon. Investig.* 2019, 8, pp. 303–312.