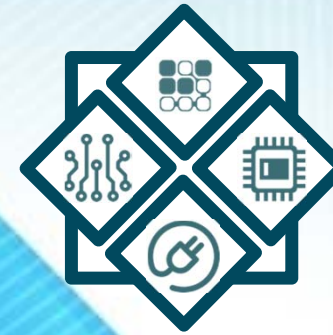


ХІ МНТК «ДАТЧИКИ, ПРИЛАДИ ТА СИСТЕМИ – 2024»



ДПС - 2024

Міжнародна
науково-технічна
конференція
"Датчики, прилади
та системи"

ЗБІРНИК ПРАЦЬ

XI Міжнародної науково-технічної конференції

ДАТЧИКИ, ПРИЛАДИ ТА СИСТЕМИ – 2024»

присвяченої пам'яті професора Шарапова В.М.

**30 – 31 травня 2024 р.
Черкаси**

ЗБІРНИК ПРАЦЬ

XI Міжнародної науково-технічної конференції «ДАТЧИКИ, ПРИЛАДИ ТА СИСТЕМИ – 2024»

присвяченої пам'яті професора Шарапова В.М.

Головний редактор – д.т.н., професор Бондаренко Максим Олексійович
Відповідальний за випуск – доктор філос. Топтун Анна Володимирівна

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Bożena Gajdzik – Dr hab. inż., Professor PS,
Silesian University of Technology, Poland
Cristian Barz – PhD, Associate Professor Eng.,
TU of Cluj-Napoca, North University Center
of Baia Mare, Romania
Dorota Wójcicka-Migasiuk – Dr hab. inż.,
Professor, Politechnika Lubelska, Poland
Michał Bembenek – D.Sc.Tech., Professor, AGH
USTK, Poland
Mykhaylo Pashechko – Dr hab. inż., Professor,
Politechnika Lubelska, Poland
Oleksandra Hotra – Dr hab. inż., Professor,
Politechnika Lubelska, Poland
Ryszard Machnik – D.Sc.Tech., Professor, AGH
USTK, Poland
Аксёнов В.В. – ЧНДЦЕКЦ МВС України,
Черкаси
Алпатов А.П. – д-р техн. наук, професор, член-
кор. НАНУ, ІТМ НАНУ та НКАУ, Дніпро
Антонюк В.С. – д-р техн. наук, професор,
НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», Київ
Гальченко В.Я. – д-р техн. наук, професор,
ЧДТУ, Черкаси
Гордієнко В.І. – д-р техн. наук, стар. наук.
співроб., ЧДТУ, Черкаси
Єременко В.С. – д-р техн. наук, професор,
НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», Київ
Квасніков В.П. – д-р техн. наук, професор,
НАУ, Київ
Квстний Р.Н. – д-р техн. наук, професор,
ВНТУ, Вінниця
Кошовий М.Д. – д-р техн. наук, професор,
НАКУ «ХАІ», Харків
Мусієнко М.П. – д-р техн. наук, професор, ЧНУ
ім. Б. Хмельницького, Черкаси
Ропяк Л.Я. – д-р техн. наук, професор, ІФНУ
нафти і газу, Івано-Франківськ
Рудницький В.М. – д-р техн. наук, професор,
ДНДІВCOBT, Черкаси
Ситніков В.С. – д-р техн. наук, професор,
ОНПУ, Одеса
Тимчик Г.С. – д-р техн. наук, професор, НТУУ
«КПІ ім. І. Сікорського», Київ
Халіяко В.В. – ЧНДЦЕКЦ МВС України,
Черкаси

У НОМЕРІ

- ☐ МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ДАТЧИКІВ, ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ
- ☐ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОЄКТУВАННЯ ТА
ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДАТЧИКІВ, ПРИ-
ЛАДІВ І СИСТЕМ ДЛЯ РОБОТОТЕХ-
НІКИ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ
- ☐ КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ
- ☐ МІКРО- ТА НАНОТЕХНОЛОГІЇ У
ПРИЛАДОБУДУВАННІ
- ☐ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У
ЕКСПЕРТНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ
- ☐ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ
ТЕХНОЛОГІЇ
- ☐ НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ТА
СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО
МОНІТОРИНГУ
- ☐ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА
ЕНЕРГОБЕЗПЕКА
- ☐ ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У
МЕДИЧНОМУ ПРИЛАДОБУДУВАННІ
- ☐ ЕКОНОМІКА, МЕНЕДЖМЕНТ ТА
МАРКЕТИНГ У ПРИЛАДОБУДУВАННІ
- ☐ ШЛЯХИ РЕАЛІЗАЦІЇ ОСВІТНІХ
ТЕХНОЛОГІЙ ЗА ПЕЦІАЛЬНОСТЯМИ
ТЕХНІЧНОГО ПРОФІЛЮ

АДРЕСА ОРГКОМІТЕТУ

Україна, 18006, м. Черкаси,
бул. Т. Шевченка, 460, ЧДТУ,
кафедра ПМКТ, оргкомітет
IX Міжнарод. наук.-техн. конференції
“Датчики, прилади та системи – 2024”

ЗМІСТ

ДАТЧИКИ, ПРИЛАДИ ТА СИСТЕМИ – 2024

Гожий О. О. Оперативна пам'ять, як об'єкт дослідження в комп'ютерно-технічних експертизах	3
Пташкін Р. Л. Спеціалізовані програмні засоби для дослідження мобільних пристроїв в рамках судових комп'ютерно-технічних експертиз	6
Рудаков С. В., Отрош Ю. А. Метрологічне рішення нелінійності рівнянь в складі інформаційно-вимірювальних систем	9
Довгаль А. В. Високовольтний вимірювальний підсилювач	13
Рашкевич Н. В., Отрош Ю. А. Вдосконалення системи протипожежного захисту трансформаторних підстанцій	16
Матюшин О. В., Вислоух С. П. Метод підвищення ефективності процесу оброблення отворів в деталях з композиційних матеріалів	19
Лаппо І. М., Чередніков О. М., Ляшенко В. А. Сучасні вимоги до металодетекторів для гуманітарного розмінування	23
Потапов О. І., Дробот О. А., Тertiшнік Є. М. Методика побудови кваліметричної моделі високотехнологічної інформаційно-вимірювальної системи до підготовки та проведення випробувань	27
Кожевніков В. В., Аксьонов В. В. Використання штучного інтелекту в галузі криміналістики та судової експертизи	30
Кошовий М. Д., Костенко О. М., Ковшар Н. Є. Волоконно-оптичний датчик температури	33
Гуральник Ф. Б. Використання штучного інтелекту для автоматизації тестування REST API	36
Кузьміч О. Є., Аркушенко П. Л., Андрушко М. В., Тertiшнік Є. М. Аналіз характеристик і можливостей застосування вимірювальних систем та датчиків для випробування захисного спорядження сапера	38
Тарасенко Я. В., Приходько С. М. Шляхи підвищення ефективності вимірювань при вібраційних випробуваннях	40
Ситніков Т. В., Біленко А. О., Бадерко І., Ситніков В. С. Дослідження фазочастотних характеристик при застосуванні однотипних смугових фільтрів для підвищення порядку обробки сигналів	42
Купріянов О. М., Ситніков В. С. Аналіз методів обробки даних у розподілених програмованих системах на базі мікросервісної архітектури	45
Орлов С. В., Геращенко М. О. Аналіз методів лабораторних вібраційних випробувань радіоелектронної апаратури	49
Гордієнко В. І., Васильченко В. Ю., Коваленко О. О. Підвищення точності вимірювання кутових координат в широкому діапазоні кутів оптико електронним датчиком	52
Наймитенко С. І., Подорожняк А. О. Стан та перспективи розвитку сервісу для розумного протезу	53

Сторчак А. В., Гальченко В. Я. Система вихрострумового вимірювання приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об'єктів	56
Лукаsevич В. С., Канашевiч Г. В., Мацева С. М. Оптичне волокно-багатофункціональний елемент сучасного медичного обладнання	60
Тичков В. В., Трембовецька Р. В., Тичкова Н. Б., Гальченко В. Я. Непрямі вимірювання фізичних властивостей пласких провідних виробів вихрострумовим методом	64
Андрієнко О. М., Колеснікова К. В. Enterprise resource planning (erp)-системи в Україні, поточний стан та перспективи розвитку	71
Засядько А. А., Литовченко В. В., Підгорний М. В. N-гранна схема оцінки відмов інформаційної системи "людина-транспортний засіб-середовище"	73
Діордіца І. М., Іваненко Р. О. Координатне розташування датчика у різальному інструменті	77
Demenskyi O. M., Yerochin S. Yu., Krasnov V. A., Shutov S. V. Improvement of the method of double-drift gap structures formation for ThZ radiation sources	79
Kartal K., Lobunko O. Gas turbine technical condition control system heat engine	81
Pylypenko T., Tuz V., Shadhin V. Optimization of laser processing by means of network information technologies	85
Філімонов С. О., Філімонова Н. В., Бачеріков Д. С. Базіло К. В. Підвищення тягових характеристик лінійного п'єзокерамічного двигуна на основі біморфних п'єзоелементів для використання в системах автоматизації	88
Усенко Є. А., Туз В. В., Dzierwa A. Адаптивне керування процесом мультифіламентного 3D друку	91
Вязовик В. М. Ініціювання первинних стадій горіння газоподібного палива електроннокаталітичним методом	94
Вознюк Є. В., Туз В. В. Використання home assistant для створення єдиної екосистеми	97
Ярославський А. В. Основні принципи регулювання напруги при комп'ютерному моделюванні силових трансформаторів та автотрансформаторів	100

НЕПРЯМІ ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛАСКИХ ПРОВІДНИХ ВИРОБІВ ВИХРОСТРУМОВИМ МЕТОДОМ

вихрострумний метод, ідентифікація, фізичні властивості матеріалу, обернені задачі, оптимізаційний метод, сурогатні моделі скороченої розмірності, глибокі нейромережі, апріорна інформація, глобальний екстремум.

eddy current method, identification, physical properties of the material, inverse problems, optimization method, surrogate models of reduced dimensionality, deep neural networks, a priori information, global extremum

АВТОРИ

Тичков Володимир Володимирович, канд. техн. наук, доцент, Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси

Трембовецька Руслана Володимирівна, д-р техн. наук, доцент, Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси

Тичкова Наталія Борисівна, здобувачка освітньо-наукового рівня доктора філософії, Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси

Гальченко Володимир Якович, д-р техн. наук, професор, Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси

АНОТАЦІЯ

Для підвищення точності одночасного визначення профілів електричної провідності та магнітної проникності при вихрострумних вимірюваннях запропоновано експериментально-числовий метод ідентифікації фізичних властивостей плоских металевих об'єктів засобами сурогатної оптимізації із накопиченням додаткових апріорних знань щодо них у нейромережових метамоделях із нелінійно-скороченою розмірністю. Відмінною рисою цього методу є інтеграція комбінованих ознак у сурогатну модель, що одночасно поєднує в собі переваги високопродуктивних обчислень з точки зору витрат ресурсів і виконання алгоритмів оптимізації в факторному Kernel PCA просторі. Висока точність метамоделі забезпечується однорідним планом експерименту на основі модифікованих квазіпослідовностей LPt-Соболя, які мають низький коефіцієнт розбіжності в цілому та у всіх двовимірних проекціях. Для знаходження екстремумів цільової функції під час ідентифікації використовується стохастичний метаевристичний гібридний алгоритм (низькорівнева гібридизація з генетичним алгоритмом GA) глобальної оптимізації з роями частинок PSO з еволюційним формуванням складу рою. Модельні приклади демонструють ефективність методу ідентифікації, який показав достатньо високу точність на тестових зразках.

ABSTRACT

To improve the accuracy of simultaneous determination of electrical conductivity and magnetic permeability profiles in eddy current measurements, an experimental and numerical method for identifying the physical properties of planar metal objects by means of surrogate optimization with the accumulation of additional a priori knowledge about them in neural network metamodels with nonlinearly reduced dimensionality is proposed. A distinctive feature of this method is the integration of combined features into a surrogate model, which simultaneously combines the advantages of high-performance computing in terms of resource consumption and the execution of optimization algorithms in the factor Kernel PCA space. The high accuracy of the metamodel is ensured by a homogeneous design of experiment based on modified LPt-Sobol's quasi-sequences, which have a low coefficient of discrepancy in general and in all two-dimensional projections. To find the extremes of the target function during identification, a stochastic metaheuristic hybrid algorithm (low-level hybridization with the genetic algorithm GA) of global optimization with particle swarms PSO with evolutionary formation of the swarm composition is used. The model examples demonstrate the effectiveness of the identification method, which showed a fairly high accuracy on test samples.

Серед задач ідентифікації доволі значну частину складають задачі оберненої ідентифікації властивостей матеріалів. Це викликано їх суттєвим практичним значенням для промисловості, де вони дозволяють вирішити цілу низку різноманітних проблем, пов'язаних із виробництвом та технологіями. Зокрема, в цих дослідженнях акцентується

увага на задачах оберненої ідентифікації фізичних властивостей металевих плоских об'єктів контролю (ОК). Типовими параметрами, що підлягають оцінюванню, зазвичай частіше за все є електрична провідність (ЕП) та магнітна проникність (МП). В багатьох випадках вони можуть нести інформацію щодо результатів та якості виробничого процесу або наслідків впливу на ОК агресивного середовища. Реєстрація змін фізичних властивостей ОК засобами, наприклад, вихрострумового неруйнівного контролю дозволяє здійснювати оперативне прийняття ефективних управлінських рішень щодо контрольованих процесів. Отже, одночасне визначення вказаних параметрів у результаті безконтактних вимірювань ЕРС накладним вихрострумовим перетворювачем (ВСП) над поверхнею ОК із наступною ідентифікацією розподілів ЕП та МП (тобто профілів параметрів) вздовж його товщі числовими методами є актуальним завданням, що потребує виконання.

Вказана задача не є тривіальною, оскільки відноситься до математично некоректно поставлених [1], для яких характерними є нестійкість розв'язання при наявності шуму та неконтрольованих варіацій комплексно-значного сигналу, вимірюваного ВСП. Особливістю визначення профілів ЕП та МП є поєднання процедур вимірювання та чисельного розв'язання оберненої задачі на просторі множини комплексних чисел, кожна з яких вносить відповідну специфіку у їх загальну взаємодію. І хоча певні спроби вирішення зазначеної проблеми мають місце, як, наприклад, у [2], вони ще не є достатньо досконалими та потребують подальшого прогресування, в тому числі на засадах інтелектуальних технологій.

Отже, метою статті є створення експериментально-числового методу ідентифікації фізичних властивостей плоских металевих об'єктів засобами сурогатної оптимізації із накопиченням додаткових апіорних знань щодо них у нейромережових метамоделях із нелінійно-скороченою

розмірністю для підвищення точності одночасного визначення профілів електричної провідності та магнітної проникності при вихрострумових вимірюваннях.

Оцінювання профілів ЕП та МП виконується експериментально-числовим методом, послідовність виконання етапів якого багато в чому співпадає із запропонованими у [3], але з певними змінами, що стосуються накопичення апіорних відомостей у нейромережовій метамоделі. Коротко деталізуємо ці етапи у відповідності до логіки та послідовності їх виконання, тобто наведемо фреймворк ідентифікації.

Перший етап передбачає проведення одноразового вимірювання накладним ВСП над плоским металевим ОК із реєстрацією синусоїдального сигналу ЕРС, математично представленого комплексним числом у експоненціальній формі запису, тобто з фіксацією його амплітуди та фази. На цьому завершується експериментальна частина методу ідентифікації, а всі наступні етапи стосуються виключно числовій його реалізації.

На наступному етапі визначаються ключові основні та додаткові параметри електродинамічної моделі, що описує процес вимірювання та відображає результат взаємодії електромагнітного поля із струмопровідним середовищем ОК. Отож, основними вважатимемо дискретизовані профілі ЕП $\sigma_i(z)$ та МП $\mu_i(z)$, $i = 1, \dots, L$, де L – кількість умовних шарів розбиття зони проникнення електромагнітного поля всередину ОК; а додатковими корисними – частоту f збудження електромагнітного поля зондування та діаметр $2 \cdot r$ вимірювальної котушки ВСП; тоді як додатковим завадовим – повітряний зазор між ВСП і поверхнею ОК. До апіорної інформації, котра акумулюється у метамоделі, належать ще й закони розподілу ЕП і МП. На цьому етапі також створюється комп'ютерний однорідний план експерименту [4, 5] із обов'язковим введенням до нього основних параметрів моделі, проте інкорпо-

рування визначених додаткових параметрів може відбуватися або ні, в залежності від вимог до точності розрахунків.

На третьому етапі для формування навчальної вибірки використовується високозатратна електродинамічна модель процесу вихрострумовевого контролю, яка дозволяє обчислити модельне значення ЕРС перетворювача в точках плану. Циліндрична котушка [6] збудження ВСП розміщена над магнітним та струмопровідним півпростором, котрий асоціюється із ОК. Вона має прямокутний переріз кінцевих розмірів. Збудження електромагнітного поля відбувається синусоїдальним струмом I , що змінюється з кутовою частотою $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$. Поле є квазістаціонарним, тобто хвильовими процесами у повітрі нехтуємо. Струми зміщення у ОК ігноруються внаслідок їх зневажливо малих значень у порівнянні із струмами провідності. Котушка збудження характеризується однорідною густиною струму по перерізу $i0$ та має число витків W . ОК вважається умовно багат шаровим, що дозволяє спростити представлення неперервних розподілів $\sigma(z)$ та $\mu(z)$ їх кусково-постійними апроксимаційними аналогами із L дискретних відліків. Закони розподілу фізичних параметрів ОК рахуються відомими та визначеними попередньо експериментально [7]. Математична модель створювалася при допущеннях щодо лінійності, ізотропності та однорідності середовищ. Для подальших досліджень внаслідок її універсальності та зручності використання для будь-якої кількості умовних шарів було обрано найвідомішу за популярністю аналітичну електродинамічну модель Uzal-Cheng-Dodd-Deeds [7, 8] в матричному формулюванні у модифікованому Theodoulidis [9] вигляді.

Верифікація розрахунків за «точною» моделлю виконувалася в роботах авторів [6, 10], де результати обчислень за створеним програмним забезпеченням у випадках дво- та тришарового умовного представлення ОК співставлялися із числовими розрахунками методом скінченних елементів та аналітич-

ними виразами, отриманими для цих простих ідеалізацій. Скорочення розмірності простору пошуку виконується на наступному кроці фреймворку. Метою цих перетворень є спрощення архітектури нейромережевої сурогатної моделі із одночасним спрощенням її навчання та підвищенням обчислювальної спроможності і покращення умов роботи оптимізаційного алгоритму. Скорочення виконується методом Kernel PCA [11, 12] стандартними для нього нелінійними перетвореннями із використанням ядерної функції Гаусса. Спочатку дані плану експерименту проєціюються у простір значно більшої розмірності із отриманням ядерної матриці, де лінійно нероздільні у первинному просторі суттєво нелінійні дані мають значно більші можливості до визначення незалежних змінних із незначними втратами інформації внаслідок застосування лінійного PCA. Це забезпечує перехід у значно скорочений за розмірністю PCA-простір із характерними для нього перевагами.

На п'ятому етапі виконується створення нейромережевої сурогатної моделі. Після того, як необхідні експериментальні вимірювання виконано та обчислювальні моделі підготовлено важливо запровадити продуктивну стратегію оптимізаційного процесу у скороченому просторі пошуку. На цьому етапі для знаходження екстремуму цільової функції застосовувався стохастичний метаверистичний гібридний алгоритм глобальної оптимізації роєм часток PSO із еволюційним формуванням складу рою, що є низькорівневою гібридизацією із генетичним алгоритмом GA. Гібрид довів свою ефективність розв'язання багатьох практичних задач, наприклад, у [13, 14, 15].

Завершальний етап фреймворку передбачає проєціювання відшуканих профілів фізичних параметрів ОК у первинний простір. Зворотне перетворення здійснюється виконанням ітераційного процесу [16], який втілює відповідне відтворення та є можливим при застосуванні ядерної функції Гауса.

Продемонструємо основні етапи запропонованої методології на чисельних експериментах. Для їх проведення не потрібно виконання вимірювань ВСП. Отже, перший етап буде реалізовано із синтезованими даними, отримання яких передбачено далі на етапі створення сурогатної моделі.

На другому етапі для застосування електродинамічної моделі вважатимемо заданими її параметри: дискретизовані профілі ЕП $\sigma_i(z)$ та МП $\mu_i(z)$, $i=1, \dots, L$, де $L=60$; $f=2$ кГц, $r1=32$ мм, $r2=50$ мм, $z1=1$ мм, $z2=18$ мм, $I=1$ А, $W=100$, $r=25$ мм, $z=1$ мм, $wmes=50$. Оскільки для моделювання обмежилися тільки двома основними факторами, тому для реалізації однорідного квазі-плану експерименту задіяно комбінацію ЛПт–послідовностей $\xi1$, $\xi6$. Створення дискретизованих профілів на основі цього плану буде наведено згодом. Кількість семплів складала $N=2820$. Однорідність ПЕ в одиничному квадраті підтверджені двовимірною гістограмою та діаграмою Вороного [4, 5]. Надалі масштабуванням здійснено перехід до розмірів реального простору. Детальніше зупинимось на цьому. Зона проникнення електромагнітного поля всередину ОК визначається параметром $D=3 \times 10^{-4}$ м. До зміни мікроструктури ОК характеризується постійними значеннями ЕП σ_{deep} та МП μ_{deep} . Коли ОК піддається впливу будь-якого із фізичних факторів (температури, деформації тощо) значення ЕП та МП максимально змінюються на поверхні до σ_{surf} та μ_{surf} залишаючись незмінними на деякій глибині зони. Із-за впливу неконтрольованих фізичних факторів вважатимемо, що значення σ_{surf} та μ_{surf} можуть змінюватися в деяких апіорі визначених границях, наприклад в межах $\pm 15\%$. Тоді профілі характеризуються значеннями ЕП $\sigma_{deep}=2 \cdot 10^6$ См/м, $\sigma_{surf}=9.2 \cdot 10^6$ См/м та МП $\mu_{deep}=10$, $\mu_{surf}=29.78$, в межах яких вони змінюються у відповідності до встановлених закономірностей, визначених попередньо. Числові значення електрофізичних параметрів μ_{surf} та σ_{surf} на поверхні ОК в точках ПЕ спроектованих

масштабуванням в реальний факторний простір та із врахуванням зазначених границь діапазони зміни параметрів ЕП на поверхні ОК будуть $7.82 \cdot 10^6 \leq \sigma_{surf} \leq 10.1 \cdot 10^6$ См/м, а МП $24.531 \leq \mu_{surf} \leq 35.028$, причому σ_{deep} та μ_{deep} є незмінними на глибині зони проникнення поля для будь-яких профілів. Під час моделювання закони розподілу фізичних параметрів ОК вважатимемо відомими та визначеними попередньо [7], а саме ЕП - «експонента», МП - «гаусіан». Тоді в зазначених граничних межах зміни електрофізичних параметрів в реальному проєктному просторі здійснено обчислення розподілів ЕП та МП для всіх семплів ПЕ із дискретизацією на зазначену кількість умовних шарів. В результаті отримано масив даних в повному факторному просторі розміром $N \times 2L$, тобто розмірність факторного простору складає 120, що є досить суттєвим.

Третій етап передбачає розрахунок модельного значення ЕРС ϵ_{mod} перетворювача в точках сформованого плану із застосуванням високозатратної електродинамічної моделі.

На четвертому етапі для скорочення розмірності простору пошуку застосовано метод Kernel PCA. Для його реалізації виконано низку математичних перетворень: по-перше, спочатку виконано перехід із оригінального простору ознак у допоміжний високорозмірний проєціюванням ПЕ із розмірності D в розмірність N за допомогою гаусівського ядра [34]. В результаті отримується ядерна матриця K схожості розмірністю $N \times N$. По-друге, застосовано операцію центрування [16] до ядерної матриці та отримано матрицю Грамма. По-третє, проведено стандартний лінійний PCA до даних матриці Грамма, що передбачає сингулярний розклад SVD [17]. В результаті чого маємо матриці власних векторів та діагональну матрицю, яка містить власні значення, а точніше сингулярні числа, квадрати яких є власними значеннями. Ранжування власних значень за напрямком зменшення $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N \geq 0$, за яким

визначаються власні вектори для скороченого простору. Відбираємо перші M власних векторів за умови $M < D$. В результаті відібрано перші 15 власних векторів, сингулярні числа яких перевищують 1. Отримана скорочена матриця власних векторів розмірністю $N \times M$ з елементами g_{ij} . Отож, скорочення розмірності здійснюється просіюванням вихідних даних на 15 обраних головних компонентів.

На наступному етапі виконується створення нейромережових сурогатних моделей [18, 19, 20] на основі глибоких ANN, для яких виходами кожної з двох мереж є відповідно дійсна та уявна частини сигналу перетворювача, а входами – семпли скороченої матриці власних векторів. Поділ зразків у вибірці виконано у співвідношенні: 80% на навчання НМ, на тестування та крос-валідацію по 9.5%. Дані одного відсотку зразків не приймали участі у навчанні, проте в подальшому деякі з них використовувалися як синтезовані для перевірки достовірності розв’язку оберненої задачі реконструкції профілів.

В результаті отримано дві нейронні мережі, кожна із яких характеризується архітектурою з чотирьох прихованих шарів Re-MLP-14-9-9-7-1 та Im-MLP-15-13-10-9-1. При цьому в кожному прихованому шарі застосовувалися функції активації гіперболічного тангенсу, а в вихідному шарі – лінійна. Валідність отриманих метамоделей оцінено візуально гістограмами залишків, нормально-ймовірнісними графіками залишків, діаграмами розсіювання та діаграмами розмаху. Окрім цього, чисельно їх валідність підтверджується малими значеннями похибки $MARE_{\text{metamod}}$, %.

Завершальним кроком цього етапу є перевірка адекватності та інформативності створених метамоделей за критерієм Фішера на основі наступних показників: суми квадратів та середнього квадрату регресії, залишків та загального при рівні значущості 5% [21]. Обидві створені метамоделі є адекватними, оскільки розрахункові модельні значення критерію Фішера для них значно

перевищують його критичне значення. Так метамоделі Re-MLP-14-9-9-7-1 має значення показника Фішера $F_{15;2804}^{\text{total}} = 1.5 \cdot 10^9$, а критичне значення цього критерію з рівнем значущості $\alpha = 5\%$ та числом степенів свободи $\nu_R = 2804$, $\nu_D = 15$ складає $F_{0,05;15;2804}^{\text{table}} = 1.67$, що задовольняє умові адекватності. Для метамоделі Im-MLP-15-13-10-9-1 умова адекватності за цим критерієм також виконується, оскільки $F_{15;2804}^{\text{total}} = 2.39 \cdot 10^8$. Коефіцієнт детермінації для обох метамоделей $R^2 = 0.999$, що вказує на їх високу інформативність.

Отже, обчислювальні моделі можуть бути залучені до виконання оптимізаційного процесу в скороченому просторі пошуку, що дозволяє реалізувати наступний етап. Для перевірки достовірності розв’язку оберненої задачі реконструкції профілів було використано синтезовані дані, які були зарезервовані на етапі побудови метамоделі. Внаслідок їх властивостей для оптимізації доцільно використовувати метаевристичні алгоритми. Отже, розв’язок оберненої задачі для трьох тестових зразків здійснено із застосуванням стохастичного метаевристичного гібридного алгоритму глобальної оптимізації [13, 14, 15]. Цільова функція мінімізується в результаті зіставлення теоретичного та синтезованого сигналів ВСП. Тобто здійснено серію із декількох стартів алгоритму оптимізації та одержано вектори розв’язків у скороченому просторі, результати яких усереднено. По суті застосовано техніку мултистарту, що дозволило підвищити точність розв’язку.

Завершальний етап – це просіювання відшуканих профілів фізичних параметрів ОК у первинний простір за допомогою ітераційного зворотного перетворення Kernel PCA [16]. Отже, маємо фактичний розв’язок оберненої задачі відшукування фізичних властивостей в початковому просторі. Точність цього розв’язку оцінено значеннями абсолютної похибки визначення компонентів векторів шуканих параметрів за умови відомих векторів розв’язку μ_{test} та σ_{test} . Для

трех тестових прикладів обчислені значення цих похибок для профілів ЕП та МП відповідно для кожного умовного шару.

Висновки. Привабливим результатом числових експериментів є скорочення простору пошуку більш ніж на 85 %, що дозволило перейти від розмірності первинного простору 120 до скороченого із розмірністю 15. Це вдалося завдяки нелінійним перетворенням із використанням Kernel-PCA та ядерної функції Гаусса з аналізом власних значень отриманої матриці Грама і обмеженням на кількість головних компонент лінійного PCA при досягненні її власних значень рівня меншого за одиницю. Отримані результати підтвердили обґрунтованість такого істотного скорочення простору без суттєвої втрати інформації. Іншим показником, котрий вказує на ефективність запро-

понованого методу, є висока точність створених сурогатних моделей, що оцінена похибками $\text{MAPE}_{\text{metamod}}$ і складає $0.318 \cdot 10^{-3}$ та $1.65 \cdot 10^{-3}$ % відповідно. Такої точності метамodelей скороченої розмірності вдалося досягти завдяки використанню однорідного комп'ютерного ПЕ та мереж глибокого навчання. Числовими показниками доведені адекватність та інформативність побудованих сурогатних моделей. Верифікація методу реконструкції фізичних властивостей об'єкту контролю здійснена на синтетично згенерованих даних (тестових зразках), які заздалегідь відомі. У результаті дослідження встановлено, що похибки MAPE реконструкції профілів для тестових випадків у порівнянні з теоретичними розв'язками не перевищують 0.05%.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Liu, G. R., Han, X. (2003). *Computational inverse techniques in nondestructive evaluation*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203494486>
2. Sabbagh, H. A., Murphy, R. K., Sabbagh, E. H., Aldrin, J. C., Knopp, J. S. (2013). *Computational Electromagnetics and Model-Based Inversion*. NY, Springer-Verlag, USA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8429-6>
3. Cappelli, L., Balokas, G., Montemurro, M., Dau, F., Guillaumat, L. (2019). *Multi-scale identification of the elastic properties variability for composite materials through a hybrid optimisation strategy*. Composites Part B: Engineering, 176, 107193. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107193>
4. Halchenko, V., Trembovetska, R., Tychkov, V., Tychkova, N. (2023). *Construction of quasi-DOE on Sobol's sequences with better uniformity 2D projections*. Applied Computer Systems, 28 (1), 21-34. <https://doi.org/10.2478/acss-2023-0003>
5. Halchenko, V., Trembovetska, R., Tychkov, V., Storchak, A. (2020). *The construction of effective multi-dimensional computer designs of experiments based on a quasi-random additive recursive R-sequence*. Applied Computer Systems, 25 (1), 70-76. <https://doi.org/10.2478/acss-2020-0009>
6. Trembovetska, R., Halchenko, V., Bazilo, C. (2022, June). *Inverse Multi-parameter Identification of Plane Objects Electrophysical Parameters Profiles by Eddy-Current Method* [Paper presentation]. International Conference on Smart Technologies in Urban Engineering, Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_19
7. Uzal, E. (1992). *Theory of eddy current inspection of layered metals*. Iowa State University.
8. Theodoulidis, T. P., Kriezis, E. E. (2006). *Eddy current canonical problems (with applications to nondestructive evaluation)*.
9. Halchenko, V., Trembovetska, R., Bazilo, C., Tychkova, N. (2022, June). *Computer Simulation of the Process of Profiles Measuring of Objects Electrophysical Parameters by Surface Eddy Current Probes* [Paper presentation]. International Scientific-Practical Conference"

- Information Technology for Education, Science and Technics", Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35467-0_25
10. Raschka, S., & Mirjalili, V. (2019). *Python machine learning: Machine learning and deep learning with Python, scikit-learn, and TensorFlow 2*. Packt publishing ltd.
 11. Scholkopf, B., Smola, A. J. (2018) *Learning with kernels: support vector machines, regularization, optimization, and beyond*. MIT press.
 12. Halchenko, V. Y., Trembovetska, R. V., Tychkov, V. V. (2021). *Synthesis of eddy current probes with volumetric structure of the excitation system, implementing homogeneous sensitivity in the testing zone*. Tekhnichna Elektrodynamika, 3, 10-18. <https://doi.org/10.15407/techne2021.03.010>
 13. Halchenko, V. Y., Trembovetska, R., Tychkov, V. (2021). *Surrogate synthesis of frame eddy current probes with uniform sensitivity in the testing zone*. Metrology and measurement systems, 28 (3). <https://doi.org/10.24425/mms.2021.137128>
 14. Halchenko, V. Y., Trembovetska, R. V., & Tychkov, V. V. (2021). *Surrogate synthesis of excitation systems for frame tangential eddy current probes*. Archives of electrical engineering, 70 (4), 743-757. <https://doi.org/10.24425/aee.2021.138258>
 15. Wang, Q. (2012). Kernel principal component analysis and its applications in face recognition and active shape models. arXiv preprint arXiv:1207.3538. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1207.3538>
 16. Halchenko, V. Y., Trembovetska, R., Tychkov, V., Tychkova, N. (2024). *Surrogate methods for determining profiles of material properties of planar test objects with accumulation of apriori information about them*. Archives of Electrical Engineering, 183-200. <https://doi.org/10.24425/aee.2024.148864>
 17. Halchenko, V., Trembovetska, R., Tychkov, V., Sapogov, M., Gromaszek, K., Smailova, S., Luganskaya, S. (2021). *Additive neural network approximation of multidimensional response surfaces for synthesis of eddy-current probes*. Przegląd elektrotechniczny, 97 (9), 46-49. <https://doi.org/10.15199/48.2021.09.10>
 18. Halchenko, V. Y., Trembovetska, R. V., Tychkov, V. V. (2019). *Development of excitation structure RBF-metamodels of moving concentric eddy current probe*. Electrical engineering & electromechanics, 28-38. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.2.05>
 19. Halchenko, V. Y., Storchak, A. V., Trembovetska, R. V., Tychkov, V. V. (2020). *The creation of a surrogate model for restoring surface profiles of the electrophysical characteristics of cylindrical objects*. Ukrainian Metrological Journal, 3, 27-35. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3.2020.216824>
 20. Halchenko, V. Y., Trembovetska, R., Tychkov, V. V. (2018). *The neurocomputing using of the development metamodels stage in the optimal surrogate antennas synthesis process*. Visnyk NTUU KPI Serii Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia, 74, 60-72. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2018.74.60-72>

Тичков, В.В., Трембовецька, Р.В., Тичкова Н.Б., Гальченко, В.Я., (30-31 травня 2024). *Непрямі вимірювання фізичних властивостей плоских провідних виробів вихрострумовим методом* [Збірник праць]. 11-та Міжнародна науково-технічна конференція «Датчики, прилади та системи – 2024», Черкаси, ЧДТУ, Україна. ※

Tychkov, V.V., Trembovetskaya, R.V., Tychkova, N.B., Halchenko, V.Ya., (2024, May 30-31). *Indirect measurements of physical properties of flat conductive products by eddy current method* [Paper presentation]. 11th International Scientific and Technical Conference "Sensors, Devices and Systems – 2024", Cherkasy, Cherkasy State Technical University, Ukraine.