

В. Я. Гальченко¹
Р. В. Трембовецька¹
В. В. Тичков¹
Н. Б. Тичкова¹

МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗВ'ЯЗАННЯ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ ОПТИМІЗАЦІЙНИМ МЕТОДОМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ СУРОГАТНОЇ МОДЕЛІ СКОРОЧЕНОЇ РОЗМІРНОСТІ

¹Черкаський державний технологічний університет

Низкою комп'ютерних експериментів досліджена ефективність за критерієм точності методу одночасного визначення розподілів електричної провідності та магнітної проникності в приповерхневій зоні плоских струмопровідних об'єктів при моделюванні процесу вихрострумове вимірювального контролю накладними перетворювачами. Метод оснований на застосуванні сурогатної оптимізації, що передбачає використання в складі цільової квадратичної функції високопродуктивної нейромережевої проксі-моделі перетворювача глибокого навчання. Сурогатна модель виконує функції носія та накопичувача апріорної інформації щодо об'єкту і враховує вплив всіх основних факторів, які є суттєвими при формуванні вихідного сигналу перетворювача. Для побудови сурогатної моделі створено комп'ютерний однорідний план експерименту на квазі-послідовностях Соболя із низькими показниками розбіжностей, як для об'ємного випадку, так і для двовимірних проєкцій. Проблеми громіздкості сурогатної моделі та пом'якшення ефекту «прокляття розмірності» вирішено застосуванням технік скорочення розмірності проєктного простору на основі алгоритму PCA із використанням сингулярного розкладу до матриці, отриманої при складанні однорідного плану експерименту на модифікованих ЛП-квазі-послідовностях Соболя. Досліджено варіанти компромісних рішень щодо розмірності PCA-простору та точністю отримання оптимізаційним методом шуканих профілів матеріальних характеристик. Головний акцент при чисельному моделюванні зроблено на дослідженні зв'язку між розмірністю нового PCA-простору та точністю отримання оптимізаційним методом шуканих параметрів оберненої задачі. Визначено прийнятні варіанти прийняття відповідних компромісних рішень. Результати моделювання оберненої вимірювальної задачі свідчать про достатньо високу точність реконструкції профілів.

Ключові слова: матеріальні характеристики, вихрострумові вимірювання, плоский об'єкт, сурогатна оптимізація, апріорна інформація, PCA-простір, метамодель, глибокі нейронні мережі

Вступ

Вихрострумове аналіз мікроструктури матеріалів є важливим інструментом у багатьох галузях науки, техніки та промисловості завдяки своїм унікальним властивостям та можливості детального аналізу перевірки якості матеріалів, визначення профілів їх матеріальних властивостей та виявлення мікроструктурних відхилень під час технологічних операцій з поверхневого їх зміцнення. В цьому дослідженні розглядається моделювання процесу вимірювального контролю плоских об'єктів, який виконується із застосуванням накладних вихрострумів перетворювачів (ВСП) для одночасного встановлення профілів електричної провідності (ЕП) та магнітної проникності (МП). Тобто саме визначення їх розподілів дозволяє зробити висновки щодо мікроструктурних особливостей ОК.

Серед методів ідентифікації профілів матеріальних характеристик ОК більшістю фахівців перевага віддається оптимізаційному [1, 2]. При цьому наявною є проблема значної кількості шуканих змінних та наявність трудомістких для обчислень цільових функцій [3, 4]. При цьому саме трудомісткість обчислень успішно вирішується застосуванням сурогатного методу оптимізації [5]. Низка останніх досліджень одночасного вирішення зазначених проблем, спрямована на використання пошукових алгоритмів оптимізації в низькорозмірному компактному просторі, що дозволяє зменшити розмірність задачі [6].

Техніки скорочення розмірності простору пошуку (Dimensionality Reduction Techniques - DRTs) дозволяють знизити громіздкість високорозмірних сурогатних моделей та суттєво пом'якшити ефект «прокляття розмірності». Так деякі техніки DRTs, а саме, методи Principal Component Analysis (PCA),

Kernel Principal Component Analysis (KPCA), Autoencoders (AEs), Variational Autoencoders (VAEs) досліджені експериментально, результати яких наведено в статті [7]. Тому, враховуючи всі переваги та недоліки відомих DRTs, перспективним для подолання проблем високої розмірності в контексті використання сурогатної оптимізації для визначення профілів матеріальних характеристик ОК виглядає PCA.

Метою роботи є дослідження на комп'ютерних експериментах ефективності за критерієм точності запропонованого методу сумісного одночасного визначення профілів електропровідності та магнітної проникності в приповерхневій зоні плоских об'єктів контролю із використанням технік сурогатної оптимізації у PCA-просторі скороченої розмірності та накопиченням у сурогатній моделі апріорної інформації щодо всіх основних факторів, які формують сигнал накладного вихрострумowego перетворювача, при варіюванні вимірністю компактного підпростору.

Результати дослідження

При моделюванні застосовувалася методологія досліджень, яка детально розглянута авторами та проілюстрована прикладами в роботах [8-10] та передбачає наступні основні етапи: "точний" розв'язок прямої електродинамічної задачі взаємодії квазістаціонарного електромагнітного поля, згенерованого накладним ВСП, із струмопровідним плоским ОК з кусково-постійними профілями матеріальних характеристик та обчислення сигналу ВСП; планування обчислювальних експериментів [11] та побудова на основі глибоких повнозв'язних MLP-нейронних мереж проксі-моделей (метамоделей) з апріорною інформацією щодо ОК; розв'язок оберненої задачі визначення профілів оптимізаційним популяційним метаевристичним алгоритмом пошуку глобального екстремуму із застосуванням сурогатної моделі.

"Точний" розв'язок прямої електродинамічної задачі здійснено із використанням електродинамічної моделі Uzal-Cheng-Dodd-Deeds [12] процесу вихрострумowego контролю у аналітичному модифікованому Theodoulidis [13] вигляді. Для реалізації цієї моделі автори створили і верифікували програмний продукт, здатний розраховувати вихідний сигнал накладного ВСП за різних умов вимірювання.

План обчислювальних експериментів включає всі основні фактори, які визначають формування вихідного сигналу накладного ВСП, зокрема матеріальні характеристики ОК, частоту електромагнітного поля зондування, повітряний зазор між ОК та ВСП [11]. Тоді враховуючи багатфакторність однорідний квазі-план експерименту реалізовано на наступних комбінаціях ЛП-послідовностей Соболя $\xi_1, \xi_6, \xi_{14}, \xi_{17}$ для кількості точок ПЕ $N_{\text{profile}} = 8191$ [11]. При масштабуванні ПЕ із одиничного гіперпростору в реальний факторний враховано, що зміна мікроструктури у приповерхневій зоні ОК характеризується початковими значеннями ЕП $\sigma_{\text{deep}} = 2 \cdot 10^6$ См/м та МП $\mu_{\text{deep}} = 10$, які залишаються незмінними на визначеній глибині приповерхневої зони, а вплив на ОК будь-якого із фізичних факторів (температури, деформації тощо) призводить до того, що значення ЕП та МП, тобто $\sigma_{\text{surf}} = 9.2 \cdot 10^6$ См/м та $\mu_{\text{surf}} = 29.78$, максимально змінюються на їх поверхні. Тоді якщо профілі матеріальних характеристик змінюються, наприклад, в межах $\pm 15\%$ відносно значень ЕП та МП на поверхні ОК, то діапазони зміни цих параметрів будуть $7.82 \cdot 10^6 \leq \sigma_{\text{surf}} \leq 10.1 \cdot 10^6$ См/м; а МП - $24.531 \leq \mu_{\text{surf}} \leq 35.028$. Для прикладу, модельне кусково-стале представлення профілів здійснюється за законом розподілу «експонента» для ЕП та «гаусіан» - для МП, які відносяться до типових залежностей, визначених експериментально в [8] для різноманітних технологічних операцій. У зазначених граничних межах зміни матеріальних характеристик ОК в реальному проектному просторі виконано обчислення розподілів ЕП та МП для всіх точок ПЕ, що відповідає кількості профілів у загальній вибірці N_{profile} із дискретизацією приповерхневої зони $D = 3 \cdot 10^{-4}$ м на $L = 60$ умовних шарів. Окрім цього, для ПЕ частота електромагнітного поля збудження задана діапазоном $1 \leq f \leq 20$ кГц, а повітряний зазор між ВСП та поверхнею ОК - $0.5 \leq z \leq 2.5$ мм. Отже, в повному факторному просторі отримано достатньо великий масив даних із розмірністю ознак 122, що суттєво впливає на складність побудови метамоделі. Вирішенням

цієї проблеми є застосування методу PCA на основі SVD-розкладу матриці Грамма, яка отримана із ПЕ, що дозволяє перейти до простору скороченої розмірності.

Отож, для визначення ефективності за критерієм точності запропонованого оптимізаційного методу реконструкції профілів у PCA-просторі виконано варіювання його розмірності на основі значень власних чисел матриці Грамма. У PCA-просторі створювалися нейромережеві сурогатні моделі. Для всіх випадків нейромереж глибокого навчання матриця у скороченому просторі має розмір $N_{\text{profile}} \times n_{\text{red}}$, де n_{red} – кількість базисних векторів в новому просторі, які в експериментах приймалися 51, 55, 62, 63, 66, 70.

Побудова метамоделей здійснювалася засобами глибокого навчання нейронних мереж [14, 15], для яких входами є скорочена матриця параметрів, а виходами кожної з двох мереж відповідно дійсна та уявна частини ЕРС ВСП. Отримано нейромережі з чотирма прихованими шарами для дійсної та уявної частин ЕРС відповідно при врахуванні різної кількості базисних векторів, ефективність навчання яких оцінено значеннями середньоквадратичних похибок MSE. Ефективність нейромереж із розмірністю PCA-простору менше 63 недостатньо прийнятна (MSE порядку 10^{-4}), тому для подальшого аналізу і побудови нейромереж відібрано лише випадки розмірності 63, 66, 70, для яких MSE значно менше зазначеної.

В результаті для $n_{\text{red}}=66$ отримано глибокі нейронні мережі rMLP-16-17-15-11-1 та iMLP-17-16-13-1 зазначеної раніше структури для дійсної та уявної частин ЕРС відповідно. Нейромережі аналогічної архітектури отримано для $n_{\text{red}}=70$ - rMLP-16-17-16-14-1 та iMLP-16-16-15-12-1. Валідність отриманих метамоделей оцінено похибками $\text{RMAE}_{\text{metamod}}$, % (Relative Mean Absolute Error) окремо для навчальної, крос-валідаційної та тестової вибірок, результати яких наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Похибки апроксимації $\text{RMAE}_{\text{metamod}}$, % отриманих метамоделей

Розмірність скороченого простору	$n_{\text{red}}=66$		$n_{\text{red}}=70$	
	Для дійсної частини ЕРС	Для уявної частини ЕРС	Для дійсної частини ЕРС	Для уявної частини ЕРС
Навчальна вибірка, $N_{\text{train}} = 4211$	0.0232	0.0305	0.0272	0.0262
Крос-валідаційна вибірка, $N_{\text{CV}} = 903$	0.0307	0.0389	0.0352	0.0367
Тестова вибірка, $N_{\text{test}} = 903$	0.0287	0.0395	0.0369	0.0345
Загальна вибірка для навчання, $N = 6017$	0.0251	0.0333	0.0299	0.029

Розв'язок оберненої задачі здійснено із застосуванням метаевристичного стохастичного алгоритму глобальної оптимізації [16, 17]. Для цього використано гібридний мультиагентний алгоритм оптимізації роєм часток з еволюційним формуванням складу рою з мінімізацією наступної квадратичної функції:

$$F(\sigma, \mu, f, z) = (C_{\text{mes}} - G_{\text{metamod}}(\sigma, \mu, f, z))^2 + (D_{\text{mes}} - Z_{\text{metamod}}(\sigma, \mu, f, z))^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

де $e_{\text{metamod}} = G_{\text{metamod}} + j \cdot Z_{\text{metamod}}$ – значення сигналу ВСП, яке отримане з використанням сурогатної моделі (метамоделі, тобто моделі на електродинамічну модель); σ, μ – відповідні вектори матеріальних характеристик ОК, що визначають шукані профілі; f – частота поля збудження; z – повітряний зазор між ВСП та ОК, $C_{\text{mes}}, D_{\text{mes}}$ – дійсна та уявна частини ЕРС вимірюваного значення сигналу ВСП.

Серією стартів алгоритму оптимізації отримано низка розв'язків та виконано зворотні перетворення з PCA-простору головних компонент у первинний простір та знайдено фактичні профілі МП, ЕП усередненням для двох тестових вимірювань ЕРС при різних

розмірностях просторів. На рисунку 1 наведено значення похибки RMAE, % реконструйованих профілів для цих вимірювань при врахуванні різної розмірності PCA-просторів.

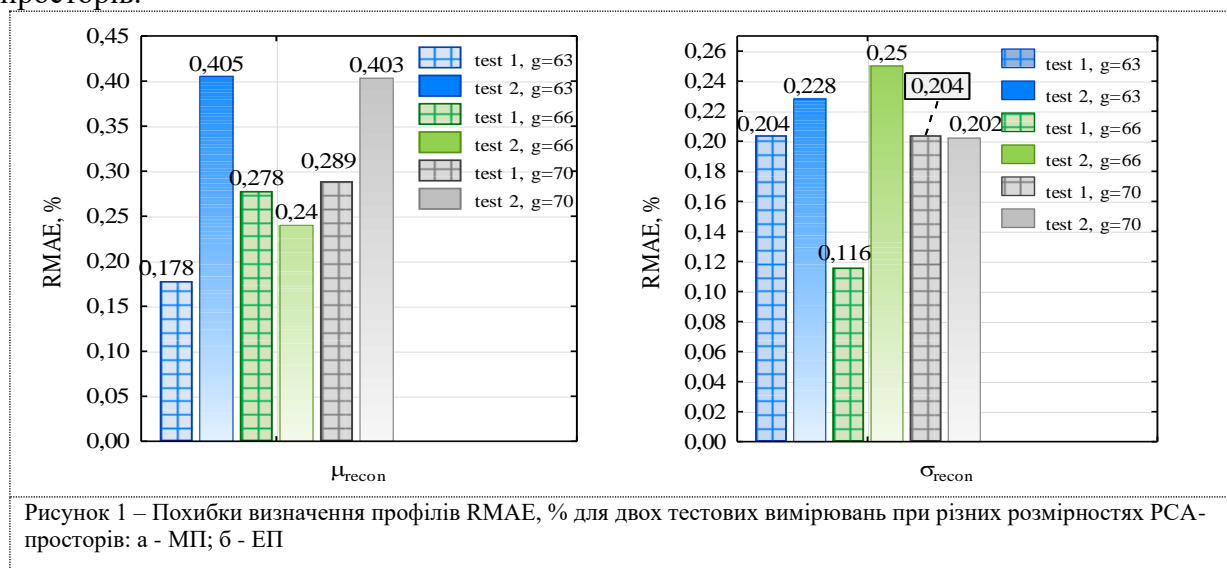


Рисунок 1 – Похибки визначення профілів RMAE, % для двох тестових вимірювань при різних розмірностях PCA-просторів: а - МП; б - ЕП

Висновки

Отже, для підвищення точності реконструкції профілів необхідно враховувати апріорну інформацію щодо впливу всіх факторів, які мають суттєву дію на формування сигналу накладного ВСП. В цьому дослідженні були враховані матеріальні характеристики ОК, частота електромагнітного поля зондування, повітряний зазор між ОК та ВСП.

Крім цього, на точність розв'язку оберненої задачі щодо реконструкції профілів МП та ЕП впливає низка складових, однією із яких є точність створених метамоделей. В цьому дослідженні показано, що з надмірним зменшенням розмірності PCA-простору, що є наслідком виключення базисних векторів, які відповідають суттєвим значенням власних чисел, виникає проблема побудови метамоделей із задовільними показниками MSE. Тоді як при врахуванні в метамоделі більшої кількості інформації внаслідок збільшення розмірності PCA-простору виникає можливість отримання високоякісних за точністю метамоделей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] J. Hampton, A. Fletcher, H. Tesfalem, A. Peyton, and M. Brown, "A comparison of non-linear optimisation algorithms for recovering the conductivity depth profile of an electrically conductive block using eddy current inspection", *NDT & E International*, 2022, 125, 102571.
- [2] Z. Xia, R. Huang, Z. Chen, K. Yu, Z. Zhang, J. R. Salas-Avila, and W. Yin, "Eddy current measurement for planar structures", *Sensors*, 2022, 22, 8695.
- [3] V. Halchenko, R. Trembovetska, C. Bazilo, and N. Tychkova, "Computer Simulation of the Process of Profiles Measuring of Objects Electrophysical Parameters by Surface Eddy Current Probes", In *International Scientific-Practical Conference "Information Technology for Education, Science and Technics"*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2022, p. 411-424.
- [4] M. Lu, "Forward and inverse analysis for non-destructive testing based on electromagnetic computation methods", *PhD Thesis*, The University of Manchester (United Kingdom), 2018.
- [5] P. Jiang, Q. Zhou, X. Shao, P. Jiang, Q. Zhou, and X. Shao, *Surrogate-model-based design and optimization*, Springer Singapore, 2020, p. 135-236.
- [6] M. Alswaitti, K. Siddique, S. Jiang, W. Alomoush, and A. Alrosan, "Dimensionality Reduction, Modelling, and Optimization of Multivariate Problems Based on Machine Learning", *Symmetry*, 2022, 14, 1282.
- [7] S. Ullah, D. A. Nguyen, H. Wang, S. Menzel, B. Sendhoff, and T. Bäck, "Exploring dimensionality reduction techniques for efficient surrogate-assisted optimization", In *2020 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence*, 2020, p. 2965-2974.
- [8] V. Y. Halchenko, V. V. Tychkov, A. V. Storchak, and R. V. Trembovetska, "Reconstruction of surface radial profiles of electrophysical characteristics of cylindrical objects during eddy current measurements with a priori data. The selection formation for the surrogate model construction", *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*, 1, 2020, p. 35-50.
- [9] V. Y. Halchenko, A. V. Storchak, R. V. Trembovetska, and V. V. Tychkov, "The creation of a surrogate model for restoring surface profiles of the electrophysical characteristics of cylindrical objects", *Ukrainian Metrological Journal*, 3, 2020, p. 27-35.
- [10] V. Y. Halchenko, A. V. Storchak, V. V. Tychkov, and R. V. Trembovetska, "Measurements of near-surface radial profiles of electrophysical characteristics of cylindrical objects by the eddy current method using a priori data", *Ukrainian Metrological Journal*, 1, 2022, p. 5-11.

- [11] V. Halchenko, R. Trembovetska, V. Tychkov, and N. Tychkova, "Construction of Quasi-DOE on Sobol's Sequences with Better Uniformity 2D Projections", *Applied Computer Systems*, 28, 1, 2023, p. 21–34.
- [12] E. Uzal, *Theory of eddy current inspection of layered metals*. Iowa State University, 1992.
- [13] T. P. Theodoulidis, and E. E. Kriezis, *Eddy current canonical problems (with applications to nondestructive evaluation)*. (No Title). 2006.
- [14] V. Y. Halchenko, R. Trembovetska, V. Tychkov, and N. Tychkova, "Surrogate methods for determining profiles of material properties of planar test objects with accumulation of apriori information about them", *Archives of Electrical Engineering*, 2024, p. 183-200.
- [15] V. Y. Halchenko, R. Trembovetska, V. Tychkov, and N. Tychkova, "Reconstruction of Electrophysical Parameter Distribution During Eddy Current Measurements of Structural Features of Planar Metal Objects", *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2024, 61, 3, p. 61-75.
- [16] V. Halchenko, R. Trembovetska, V. Tychkov, M. Sapogov, K. Gromaszek, S. Smailova, and S. Luganskaya, "Additive neural network approximation of multidimensional response surfaces for synthesis of eddy-current probes", *Przegląd elektrotechniczny*, 2021, 97, 9, p. 46-49.
- [17] V. Y. Halchenko, R. Trembovetska, and V. Tychkov, "Surrogate synthesis of frame eddy current probes with uniform sensitivity in the testing zone". *Metrology and measurement systems*, 2021, 28, 3, p. 551-564.

Гальченко Володимир Якович – д-р техн. наук, професор кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій

Черкаський державний технологічний університет, Черкаси

Трембовецька Руслана Володимирівна - д-р техн. наук, професор кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій

Тичков Володимир Володимирович – к.т.н., доцент кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій

Тичкова Наталія Борисівна – аспірантка кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій

MODELING AND SOLVING THE INVERSE PROBLEM OF EDDY CURRENT TESTING BY THE OPTIMIZATION METHOD USING A SURROGATE MODEL OF REDUCED DIMENSIONALITY

Cherkasy State Technological University

A number of computer experiments have investigated the effectiveness in terms of accuracy of the method for simultaneously determining the distributions of electrical conductivity and magnetic permeability in the subsurface zone of planar conductive objects when modeling the process of eddy current measurement testing with surface probes. The method is based on the use of surrogate optimization, which involves the application of a high-performance neural network proxy model of a deep learning probe as part of the target quadratic function. The surrogate model acts as a carrier and storage of apriori information about the object and takes into account the influence of all the main factors that are significant in the formation of the probe output signal. To build the surrogate model, a computer-generated homogeneous design of experiment was created on quasi-Sobol's sequences with low discrepancy rates, both for the three-dimensional case and for two-dimensional projections. The problems of the surrogate model's bulkiness and mitigation of the "curse of dimensionality" effect are solved by applying techniques for reducing the dimensionality of the design space based on the PCA algorithm using a singular value decomposition to the matrix obtained by drawing up a homogeneous design of experiment on modified LP_r quasi-Sobol's sequences. The paper investigates the options for compromise solutions regarding the dimensionality of the PCA space and the accuracy of obtaining the desired material characteristic profiles by the optimization method. The main emphasis in the numerical modeling is placed on the study of the relationship between the dimensionality of the new PCA space and the accuracy of obtaining the desired parameters of the inverse problem by the optimization method. Acceptable options for making appropriate compromise decisions are determined. The results of modeling the inverse measurement problem indicate a sufficiently high accuracy of profile reconstruction.

Keywords: material characteristics, eddy current measurements, planar object, surrogate optimization, apriori information, PCA space, metamodel, deep neural networks

Halchenko Volodymyr Yakovych - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Instrumentation, Mechatronics and Computerized Technologies

Cherkasy State Technological University, Cherkasy

Trembovetska Ruslana Volodymyrivna - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Instrumentation, Mechatronics and Computerized Technologies

Tychkov Volodymyr Volodymyrovych - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Instrumentation, Mechatronics and Computerized Technologies

Tychkova Nataliia Borysivna- PhD student of the Department of Instrumentation, Mechatronics and Computerized Technologies