

# Уточнене комп'ютерне моделювання процесу вимірювального контролю у вихрострумовій структуроскопії на основі врахування апріорної інформації про найвпливовіші фактори щодо об'єктів

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.033>

Володимир Гальченко

Кафедра приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій  
Черкаський державний технологічний університет  
м. Черкаси, Україна  
[halchvl@gmail.com](mailto:halchvl@gmail.com)

Володимир Тичков

Кафедра приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій  
Черкаський державний технологічний університет  
м. Черкаси, Україна  
[v.tychkov@chdtu.edu.ua](mailto:v.tychkov@chdtu.edu.ua)

*Abstract*—На основі запропонованої методології, сутність якої полягає у визначенні профілів електрофізичних параметрів плоских об'єктів вихрострумове контролю шляхом використання сурогатної оптимізації в просторі пошуку скороченої розмірності, проведено моделювання процесу вимірювального контролю з використанням накопиченої апріорної інформації щодо найвпливовіших факторів, які діють на об'єкт.

**Keywords**—моделювання процесу вихрострумове контролю; профілі магнітної проникності та електричної провідності; метамодель; апріорна інформація; глибокі нейронні мережі; РСА-простір; сурогатна оптимізація.

## I. ВСТУП

Вихрострумівий 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 їх електромагнітних властивостей, тобто їх профілів, та виявлення мікроструктурних відмінностей під час технологічних робіт з поверхневого їх зміцнення. До факторів, пов'язаних з об'єктом контролю (ОК), які мають значний вплив на вихрові струми і, відповідно, на результати вимірювань, відносяться електромагнітні властивості матеріалу, а саме електропровідність (ЕП) і магнітна проникність (МП); форма (циліндрична або плоска), розмір і конфігурація ОК; частота зміни електромагнітного поля збудження, що опосередковано визначає глибину проникнення

Руслана Трембовецька

Кафедра приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій  
Черкаський державний технологічний університет  
м. Черкаси, Україна  
[r.trembovetska@chdtu.edu.ua](mailto:r.trembovetska@chdtu.edu.ua)

Наталія Тичкова

Кафедра приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій  
Черкаський державний технологічний університет  
м. Черкаси, Україна  
[n.b.tychkova.asp21@chdtu.edu.ua](mailto:n.b.tychkova.asp21@chdtu.edu.ua)

вихрових струмів; зазор між вимірювальною катушкою і ОК.

## II. ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ

В цьому дослідженні розглядається моделювання процесу вимірювального контролю плоских об'єктів, що виконується із застосуванням накладних вихрострумівих перетворювачів (ВСП).

При моделюванні припускаємо, що ОК мають нескінченні геометричні розміри, середовище ОК вважається лінійним, однорідним та ізотропним. Визначення профілів ЕП і МП виконується чисельними розрахунками на основі даних вимірювань ВСП. Алгоритм розв'язання оберненої задачі вимірювання передбачає використання електродинамічної моделі процесу вихрострумове контролю. Для її спрощення приповерхневий прошарок ОК з певними структурними відмінностями, викликаними, наприклад, технологічними операціями поверхневого зміцнення, розглядаються як умовно багат шарові. Кожен умовний шар характеризується різними постійними значеннями електрофізичних параметрів. Імітація неперервності профілів ЕП і МП забезпечується великою кількістю умовних шарів. Електромагнітне поле збуджується генераторною катушкою ВСП з синусоїдальним струмом, що змінюється з певною кутовою частотою. Модель враховує, що катушка має прямокутний поперечний переріз скінченних розмірів, характеризується рівномірною густиною струму по перерізу і деякою кількістю витків.

На основі електродинамічної моделі [1] автори створили і ретельно перевірили програмний продукт, здатний розраховувати вихідний сигнал накладного ВСП за різних умов вимірювання. Верифікація цього продукту проводилася шляхом порівняння результатів як з розрахунками на основі аналітичних моделей, отриманих для одно- та двошарових ОК [2], так і з чисельними розрахунками методом скінченних елементів у середовищі COMSOL Multiphysics (модуль AC/DC) для тришарового об'єкта [3], де максимальна відносна похибка амплітуди і фази при визначенні векторного потенціалу не перевищувала 0,2 % і 0,5 % відповідно.

Вважалося, що під час проведення процедури вимірювання ВСП над плоским об'єктом, амплітуда і фаза сигналу фіксується відповідно до однієї з класичних схем. Математично вимірний сигнал  $e_{mes}$  може бути представлений в алгебраїчній формі у вигляді виразу:  $e_{mes} = C_{mes} + j \cdot D_{mes}$ , де  $C_{mes}$  та  $D_{mes}$  є відповідно дійсною та уявною його частинами. Така математична форма представлення сигналу дозволяє ефективніше будувати цільову функцію  $F$ , що використовується для визначення оптимальних значень шуканих параметрів моделі. Задача реконструкції профілів ЕП і МП зводиться до мінімізації наступної квадратичної функції:

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

де  $e_{metamod} = G_{metamod} + j \cdot Z_{metamod}$  – значення сигналу, яке отримане з використанням нейромережевої проксі-моделі (метамоделі) на електродинамічну модель;  $\sigma, \mu$  – відповідні вектори електрофізичних параметрів, що визначають шукані профілі;  $f$  – частота поля збудження;  $z$  – повітряний зазор між ВСП та ОК.

### III. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

При моделюванні застосовувалася методологія досліджень, яка детально розглянута авторами та проілюстрована прикладами в роботах [4–6] та передбачає наступні основні етапи:

- "точний" розв'язок прямої електродинамічної задачі взаємодії квазістационарного електромагнітного поля, згенерованого накладним ВСП, з феромагнітним плоским ОК з неперервним профілями електрофізичних параметрів;
- планування обчислювальних експериментів [7] та побудова апріорних проксі-моделей (метамоделей) з використанням електродинамічних моделей на основі глибоких повнозв'язних MLP-нейронних мереж;
- розв'язок оберненої задачі вимірювання оптимізаційним гібридним популяційним метаевристичним алгоритмом із застосуванням сурогатної моделі, створеної на основі плану експерименту отриманому на попередньому етапі.

У цих дослідженнях заключний етап має певні особливості. Сурогатна оптимізація проводиться не

в повному проектному просторі, що визначається кількістю умовних шарів профілів ЕП і МП разом, а в латентному просторі зменшеної розмірності, який зберігає майже всі властивості повного простору з невеликою втратою інформації. Таке компактне представлення простору пошуку стало можливим завдяки використанню методу PCA (Principal Component Analysis), який лінійними перетвореннями визначає основні напрямки у просторі високої розмірності, що мають найбільший вплив на мінливість даних. Отже, в процесі оптимізації можна знайти компроміс між точністю розв'язку задачі і витратами обчислювальних ресурсів, контролюючи і вибираючи розмірність латентного простору пошуку. Після застосування оптимізаційного алгоритму виконується повернення до реального простору для визначення шуканих профілів ЕП та МП. Отримані результати чисельного моделювання свідчать щодо досить високої точності розв'язку оберненої задачі.

### IV. ВИСНОВКИ

Комп'ютерним моделюванням доведено ефективність запропонованих методів визначення профілів електрофізичних параметрів плоских ОК із застосуванням новітніх сурогатних стратегій у поєднанні з сучасними техніками глобальної оптимізації. Для мінімізації цільової функції застосовано евристичний біонічний гібридний алгоритм пошуку глобального екстремуму роєм часток із еволюційним формуванням складу рою. Створене алгоритмічне і програмне забезпечення реконструкції електрофізичних профілів ОК складає визначальні здобутки дослідження.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] T. P. Theodoulidis, and E. E. Kriezis, "Eddy current canonical problems (with applications to nondestructive evaluation)," Tech Science Press, 2006.
- [2] R. Trembovetska, V. Halchenko, and C. Bazilo, "Inverse multi-parameter identification of plane objects electrophysical parameters profiles by eddy-current method," International Conference on Smart Technologies in Urban Engineering (June, 2022), Cham: Springer International Publishing, pp. 202–212.
- [3] V. Halchenko, R. Trembovetska, C. Bazilo, and N. Tyckova, "Computer Simulation of the Process of Profiles Measuring of Objects Electrophysical Parameters by Surface Eddy Current Probes," International Scientific-Practical Conference "Information Technology for Education, Science and Technics" (June, 2022), Cham: Springer Nature Switzerland, pp. 411–424.
- [4] V.Y. Halchenko, V.V. Tyckov, 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*, vol. 1, 2020, pp. 35–50.
- [5] V.Y. Halchenko, A.V. Storchak, R.V. Trembovetska, and V.V. Tyckov, "The creation of a surrogate model for restoring surface profiles of the electrophysical characteristics of cylindrical objects," *Ukrainian Metrological Journal*, vol. 3, 2020, pp. 27–35.
- [6] V.Y. Halchenko, A.V. Storchak, V.V. Tyckov, 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*, vol. 1, 2022 pp. 5–11.
- [7] V. Halchenko, R. Trembovetska, V. Tyckov, and N. Tyckova, "Construction of Quasi-DOE on Sobol's Sequences with Better Uniformity 2D Projections," *Applied Computer Systems*, vol. 28(1), 2023, 21–34.