

Тичкова Н. Б., аспірантка

Тичков В. В., к.т.н., доцент

Трембовецька Р. В., д.т.н., доцент

Гальченко В. Я., д.т.н., професор

кафедра приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій

Черкаський державний технологічний університет

ВИМІРЮВАННЯ ПРОФІЛІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ ТА МАГНІТНОЇ ПРОНИКНОСТІ ВИХРОСТРУМОВИМИ ПЕРЕТВОПРЮВАЧАМИ ІЗ ВРАХУВАННЯМ АПРІОРНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ЩОДО БАГАТОЧАСТОТНИХ РЕЖИМІВ

Вихрострумова структуроскопія є специфічним видом неруйнівного контролю виробів та матеріалів, для якого характерним є застосування математичного моделювання як на підготовчому етапі, так і в процесі виконання вимірювальних операцій. Це обумовлено суттєвою складністю визначення структурозалежних параметрів, зокрема магнітної проникності (МП) та електропровідності (ЕП), безпосередньо в процесі фізичних вимірювань із-за необхідності фіксації не їх інтегральних значень для об'єктів контролю (ОК), а відповідно їх розподілів у приповерхневому шарі матеріалу об'єкта, тобто їх профілів. Одночасна реконструкція обох профілів електрофізичних параметрів по результатам однократного вимірювання вихрострумовим перетворювачем (ВСП) дозволяє на основі взаємозв'язків між електромагнітними властивостями та мікроструктурними змінами в металах зробити висновки щодо чистоти їх складу, стану термічної обробки, стану внутрішньої напруги, твердості, температури тощо. Отже, внаслідок надзвичайної важливості для забезпечення якості продукції та нормальної безаварійної роботи обладнання задача є актуальною для багатьох галузей промисловості та завжди була об'єктом уваги дослідників [1,2]. Задача є

доволі неординарною, відноситься до некоректно поставлених та її можна класифікувати як обернену вимірювальну задачу.

Загальний сучасний стан досліджень, що проводилися в цьому напрямку, досить детально проаналізовано авторами в роботах [3,4], де виявлено основні напрямки подальшого вдосконалення підходів. Однак останнім часом прослідковується тенденція, спрямована на використання фізичних багаточастотних вимірювальних технік та їх певних різновидів, які дозволяють отримати більшу додаткову кількість інформації щодо взаємодії електромагнітного поля збудження перетворювачів з ОК [5-7], що є одним з методів покращення умов розв'язку оберненої задачі. Та ж сама мета переслідується використанням при вимірюваннях змінних у часі частот [8-10]. Загальним недоліком цих підходів є суттєва складність проведення фізичних вимірювань, а, відповідно, алгоритмів обробки сигналів, збільшення часу на встановлення результатів контролю. Але переваг цього підходу можливо досягти без проведення серій фізичних вимірювань безпосередньо на ОК, якщо перенести збір та накопичення додаткової апріорної інформації щодо ОК на етап моделювання, який передуює процедурам вимірювання, та зберігає її у метамоделі [3]. Крім того, ще однією функцією метамоделі є високопродуктивне, без зайвих значних витрат часу, обчислення сигналу ВСП, що використовується як складова для конструювання цільової функції в рамках пропонованого сурогатного оптимізаційного методу розв'язку досліджуваної задачі.

Отже, **мета роботи** полягає в дослідженні засобами комп'ютерної імітації процесу вихрострумове визначення електрофізичних профілів плоских об'єктів контролю на основі реалізації сурогатної оптимізації в активному компактному підпросторі скороченої розмірності із застосуванням апріорного накопичення інформації в метамоделі, що отримана попереднім моделюванням із варіюванням профілями та багаточастотних режимах роботи перетворювачів.

Запропонована методологія досліджень полягає у наступному. Вимірювальний процес щодо реконструкції профілів електрофізичних параметрів ОК оснований на розв'язку оптимізаційної задачі із застосуванням технік сурогатного моделювання. Тобто передбачено однократне вимірювання ВСП ЕРС при контролі плаского ОК. Його результатом є зафіксовані значення амплітуди і фази сигналу, які для подальших обчислень зручно представити в алгебраїчній формі комплексного числа. Тоді $e_{mes} = C_{mes} + j \cdot D_{mes}$, де C_{mes} та D_{mes} є відповідно дійсною та уявною частинами вимірної ЕРС. Математично задача реконструкції профілів ЕП та МП полягає в мінімізації наступної квадратичної функції, яка представляє собою цільову функцію в оптимізаційному алгоритмі:

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

де $e_{metamod} = G_{metamod} + j \cdot Z_{metamod}$ – значення ЕРС, яке обчислене з використанням високопродуктивної нейромережевої метамоделі [11] на електродинамічну модель e_{mod} , що залежить від шуканих профілів електрофізичних параметрів, позначених відповідними векторами σ , μ ; f – частота збудження ВСП, на якій виконується вимірювання.

Для розв'язку оберненої вимірювальної задачі використовуємо оптимізаційний метод, який мінімізує різницю між вимірним значенням ЕРС ВСП та теоретичним значенням ЕРС, яке обчислене з використанням електродинамічної моделі. Після проведення оптимізації отримаємо профілі електрофізичних параметрів проникності та провідності. Але для суттєвого зменшення вимог до обчислювальних ресурсів запропоновано використовувати сурогатну оптимізацію, що передбачає створення сурогатної моделі. Для побудови моделі-замісника, тобто метамоделі, яка є значно менш ресурсоємною та наближено з прийнятною точністю відтворює “точну”, на основі глибоких повнозв'язних нейронних мереж необхідним є створення навчальної вибірки. Для цього використовуємо точну

електродинамічну модель в сукупності з однорідним комп'ютерним планом експерименту.

Запропоновано два підходи для вирішення поставленої задачі.

Перший підхід класична сурогатна оптимізація - створення високопродуктивної метамоделі у просторі пошуку, вимірність якого визначається сумуванням розмірностей векторів проникності та провідності. На основі отриманої навчальної вибірки створені метамоделі для дійсної та уявної частин ЕРС ВСП. Розраховані середні значення похибок апроксимації $MARE$ для навчальної, крос-валідаційної та тестових вибірок у співвідношенні 70x15x15 %. Побудовані діаграми розсіювання метамоделей для дійсної та уявної частин окремо. В подальшому здійснено сурогатну оптимізацію. За результатами класичного сурогатного моделювання отримано результати визначення профілів проникності та провідності для їх технологічних та реконструйованих значень. Розраховані усереднені значення похибок $MARE$ для кожного профілю проникності та провідності. Реалізація першого методу дає похибку $MARE_{\mu}$, яка не перевищує в найкращому випадку вимірювань 5.53 % та $MARE_{\sigma}$ - 5.14 % відповідно.

Другий підхід також використовує техніку сурогатної оптимізації з усіма вказаними вище нюансами. Але оптимізація виконується у просторі пошуку скороченої вимірності, тобто компактному просторі. Його вимірність припускає корегування, що дозволяє відшукати баланс між обчислювальною складністю й точністю результатів розв'язку задачі. Скорочення вимірності простору виконується в результаті застосування методу PCA лінійного відображення даних у новий простір властивостей, які не залежать один від одного, з незначними втратами кількості інформації. Перехід до компактного простору реалізується використанням технік сингулярного розкладу SVD до матриці Грама, отриманої з навчальної вибірки, з наступним аналізом сингулярних чисел та вибором власних векторів, які забезпечують найбільші дисперсії у новій скороченій системі координат. В цьому випадку метамоделі

доводиться створювати у компактному просторі, в якому також виконується оптимізація. Після знаходження розв'язку необхідним є перехід до початкової системи координат. В результаті раціонального регульованого вибору вимірності компактного простору пошуку такий гібридний підхід призводить до значного скорочення змінних для оптимізаційного алгоритму, скорочення часу обчислень без суттєвої втрати точності розв'язку, що робить його вельми результативним. Отримані в просторі скороченої вимірності метамоделі для дійсної і уявної частин та проведена оцінка точності їх навчання з похибками $MARE$. Побудовані гістограми розподілів абсолютних похибок дійсної й уявної частин, індукованої у вимірювальному витку ВСП ЕРС, які отримані з використанням створених метамоделей для повної вибірки. Реалізація другого методу дає похибку $MARE_{\mu}$, яка не перевищує в найкращому випадку вимірювань 0.55 % та $MARE_{\sigma}$ - 0.38 % відповідно.

Отже, в дослідженні виконано верифікацію методу визначення електрофізичних профілів плоских об'єктів на основі комп'ютерної імітації процесу вихрострумовеого контролю, який оснований на апріорному накопиченні моделюванням інформації щодо них. Метод передбачає розв'язок оптимізаційної задачі із застосуванням технік сурогатного моделювання. Розв'язано обернену задачу реконструкції профілів ЕП та МП, яка полягає в мінімізації квадратичної цільової функції в активному компактному підпросторі пошуку скороченої розмірності. В методі використано евристичний біонічний гібридний алгоритм пошуку глобального екстремуму.

Побудовані метамоделі НВСП на основі глибоких повнозв'язних нейронних мереж, що враховують окрім електрофізичних параметрів ОК додатково ще і частоти, на яких можливі вимірювання. Точність метамоделей забезпечена застосуванням розщеплення комплекснозначної нейронної мережі на дві дійснозначні для апроксимації дійсної та уявної частин сигналу ВСП та застосуванням глибокого навчання. Використання методу PCA

дозволило суттєво спростити умови пошуку екстремуму оптимізаційним алгоритмом та отримати ліпші значення розв'язків у порівнянні з пошуком в повнофакторному просторі, не дивлячись на деяку втрату частки повної інформації щодо об'єктів контролю. Числовими експериментами доведено ефективність одночасної реконструкції профілів ЕП та МП при використанні додаткової інформації про багаточастотні вимірювання, що дозволило підвищити точність їх визначення в результаті досконалішого врахування взаємодії електромагнітного поля збудження перетворювачів з ОК.

Список використаної літератури:

1. Bowler, N. (2019). *Eddy-current nondestructive evaluation*. Springer New York.
2. Lu, M. (2018). *Forward and inverse analysis for non-destructive testing based on electromagnetic computation methods*. The University of Manchester (United Kingdom). https://pure.manchester.ac.uk/ws/portalfiles/portal/73361551/FULL_TEXT.PDF
3. Halchenko, V. Y., Tychkov, V. V., Storchak, A. V., & Trembovetska, R. V. (2020). 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), 35-50. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2020.204226>
4. Trembovetska, R., Halchenko, V., & Bazilo, C. (2022). Inverse multi-parameter identification of plane objects electrophysical parameters profiles by eddy-current method. In *Smart Technologies in Urban Engineering: Proceedings of STUE-2022* (pp. 202-212). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_19
5. Hampton, J., Fletcher, A., Tesfalem, H., Peyton, A., & Brown, M. (2022). 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*, 125, 102571. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102571>

6. Tesfalem, H., Hampton, J., Fletcher, A. D., Brown, M., & Peyton, A. J. (2021). Electrical resistivity reconstruction of graphite moderator bricks from multi-frequency measurements and artificial neural networks. *IEEE Sensors Journal*, 21(15), 17005-17016. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3080127>
7. Tesfalem, H., Peyton, A. J., Fletcher, A. D., Brown, M., & Chapman, B. (2020). Conductivity profiling of graphite moderator bricks from multifrequency eddy current measurements. *IEEE Sensors Journal*, 20(9), 4840-4849. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2965201>
8. Xu, J., Wu, J., Xin, W., & Ge, Z. (2020). Measuring ultrathin metallic coating properties using swept-frequency eddy-current technique. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(8), 5772-5781. <https://doi.org/10.1109/TIM.2020.2966359>
9. Xu, J., Wu, J., Xin, W., & Ge, Z. (2020). Fast measurement of the coating thickness and conductivity using eddy currents and plane wave approximation. *IEEE Sensors Journal*, 21(1), 306-314. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3014677>
10. Huang, P., Zhao, J., Li, Z., Pu, H., Ding, Y., Xu, L., & Xie, Y. (2023). Decoupling Conductivity and Permeability Using Sweep-Frequency Eddy Current Method. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 72, 1-11. <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3242017>
11. Halchenko, V. Ya., 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:10.24425/ae.2021.138258>