

УДК 620.179.147+519.853.6

В.Я. ГАЛЬЧЕНКО, Р.В. ТРЕМБОВЕЦЬКА, В.В. ТИЧКОВ
Черкаський державний технологічний університет

ТЕХНІКИ СТВОРЕННЯ СУРОГАТНИХ МОДЕЛЕЙ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ В ГІПЕРПРОСТОРІ ЗАСОБАМИ АДИТИВНОЇ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ АПРОКСИМАЦІЇ

Сформульовано задачу багатовимірної апроксимації функціональних апроксимаційних залежностей розподілу густини вихрових струмів для низки структур систем збудження накладних вихрострумів перетворювачів. Запропоновано універсальну методологію щодо побудови багатовимірних апроксимаційних моделей (сурогатних моделей) різновидів систем збудження накладних вихрострумів перетворювачів. Розглянуто метод опису «точними» математичними моделями процесу взаємодії рухомого вихрострумівого перетворювача з об'єктом контролю, який є обов'язковою складовою запропонованої методології. Комп'ютерний план обчислювального експерименту запропоновано реалізовувати на основі квазівипадкових послідовностей із мінімальним розходженням, а саме із застосуванням ЛП_τ-послідовностей Соболя та адитивних рекурсивних R_τ-послідовностей Кронекера. Для побудови багатовимірних сурогатних моделей запропоновано використовувати гібридний підхід, що передбачає розбиття простору пошуку на декілька декомпозиційних областей, в кожній із яких здійснюється локальна апроксимація, з наступним об'єднанням складових частин апроксимацій в єдину неперервну модель та одночасне застосування адитивно-комітетної нейромережевої технології. Верифікація створених багатовимірних сурогатних моделей здійснюється оцінкою їх адекватності та інформативності за низкою статистичних показників, а саме, коефіцієнту детермінації, відношення стандартних відхилень, середньої величини модельної похибки, залишкового середнього квадрата похибки та оцінкою відновлення з їх використанням гіперповерхні відгуку.

Розглянуто приклади апроксимаційних залежностей накладних вихрострумів перетворювачів із різними геометричними формами системи збудження, а саме, круговою і рамковою та різними структурами як планарними, так і об'ємними. Для кожного з розглянутого прикладу наведено результати відтворення багатовимірних поверхонь відгуку у вигляді ліній рівня, отриманих за допомогою апроксимаційних моделей. Якість створених сурогатних моделей оцінювалася діаграмами розсіювання, відносним значенням похибки апроксимації та гістограми розподілу цих похибок.

Ключові слова: однорідний накладний вихрострумівий перетворювач, густина вихрових струмів, однорідний розподіл, гіперповерхня відгуку, багатовимірні моделі апроксимації, сурогатна модель, метамодель, комп'ютерний план експерименту, адитивна нейромережева регресія.

В.Я. ГАЛЬЧЕНКО, Р.В. ТРЕМБОВЕЦКАЯ, В.В. ТЫЧКОВ
Черкасский государственный технологический университет

ТЕХНИКИ СОЗДАНИЯ СУРРОГАТНЫХ МОДЕЛЕЙ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ГИПЕРПРОСТРАНСТВЕ СРЕДСТВАМИ АДДИТИВНОЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ АППРОКСИМАЦИИ

Сформулирована задача многомерной аппроксимации функциональных аппроксимационных зависимостей распределения плотности вихревых токов для нескольких структур систем возбуждения накладных вихретоковых преобразователей. Предложена универсальная методология для построения многомерных моделей аппроксимации (суррогатных моделей) разновидностей систем возбуждения накладных вихретоковых преобразователей. Рассмотрен метод описания «точными» математическими моделями процесса взаимодействия движущегося вихретокового преобразователя с объектом контроля, который является обязательной составляющей предложенной методологии. Компьютерный план вычислительного эксперимента предложено реализовывать на основе квазислучайных последовательностей с минимальным расхождением, а именно, с использованием ЛП_τ-последовательностей Соболя и адитивных рекурсивных R_τ-последовательностей Кронекера. Для построения многомерных суррогатных моделей предложено использовать гибридный подход, заключающийся в разбиении пространства поиска на несколько декомпозиционных областей, в каждой из которых осуществляется локальная аппроксимация, с последующим объединением составных частей аппроксимаций в одну непрерывную модель и одновременным использованием адитивно-комитетной нейросетевой технологии. Верификация созданных многомерных суррогатных моделей осуществляется оценкой их адекватности и информативности рядом статистических показателей, а именно,

коэффициентом детерминации, отношением стандартных отклонений, средней модельной погрешностью, остаточным средним квадратом погрешности и оценкой восстановления с их использованием гиперповерхности отклика.

Рассмотрены примеры аппроксимаций накладных вихретоковых преобразователей с различными геометрическими формами систем возбуждения, а именно, круговой и рамковой и разными структурами как планарными, так и объемными. Для каждого рассмотренного примера приведены результаты воспроизведения многомерных поверхностей отклика в виде линий уровня, полученных с помощью методов аппроксимации. Качество созданных суррогатных моделей оценивалось диаграммами рассеивания, относительным значением погрешности аппроксимации и гистограммами распределения этих погрешностей

Ключевые слова: однородный накладной вихретоковой преобразователь, плотность вихревых токов, однородное распределение, гиперповерхность отклика, многомерные модели аппроксимации, суррогатная модель, метамодель, компьютерный план эксперимента, аддитивная нейросетевая регрессия.

V. Ya. HALCHENKO, R. V. TREMBOVETSKA, V. V. TYCHKOV
Cherkasy State Technological University

TECHNIQUES FOR CREATING SURROGATE MODELS OF EDDY-CURRENT PROBES IN HYPERSPACE BY MEANS OF ADDITIVE NEURAL NETWORK APPROXIMATION

The problem of multidimensional approximation of functional approximation dependences of the eddy current density distribution for several structures of excitation systems of surface eddy current probes is formulated. A universal methodology for the construction of multidimensional approximation models (surrogate models) of various excitation systems of surface eddy current probes is proposed. The method of describing the "exact" mathematical models of the interaction process of a moving eddy current probe with the testing object, which is a mandatory component of the proposed methodology, is considered. The computer design of the computational experiment is proposed to be realized on the basis of quasi-random sequences with minimal difference, namely with the use of Sobol's LP_r-sequences and additive recursive R_d-sequences of Kronecker. To design multidimensional surrogate models, it is proposed to use a hybrid approach, which consists in dividing the search space into several decomposition areas, in each of which local approximation is carried out, followed by combining the constituent parts of the approximations into one continuous model and the simultaneous use of additive-committee neural network technology. Verification of the created multidimensional surrogate models is carried out by assessing their adequacy and informativeness on a number of statistical indicators, namely the coefficient of determination, the ratio of standard deviations, the mean model error, the residual mean square error and the assessment of recovery using their response surface.

Examples of approximation dependences of surface eddy current probes with different geometric shapes of the excitation system, namely circular and frame and different structures, both planar and three-dimensional, are considered. For each of the considered examples the results of reproduction of multidimensional response surfaces in the form of level lines obtained by means of approximation models are given. The quality of the created surrogate models was evaluated by scattering diagrams, the relative value of the approximation error and the histogram of the distribution of these errors.

Keywords: homogeneous surface eddy current probe, eddy current density, homogeneous distribution, response hypersurface, multidimensional approximation models, surrogate model, metamodel, computer design of experiment, additive neural network regression.

Постановка проблеми

Розвиток засобів неруйнівного вихрострумовеого контролю, викликаний необхідністю виконання завдань дефектометрії, призвів до потреби однорідних накладних вихрострумівих перетворювачів (ОНВСП). Застосування ОНВСП, які генерують однорідний розподіл густини вихрових струмів (ГВС) в об'єктах контролю (ОК), дозволяє забезпечити однорідну чутливість до дефектів суцільності. Тому створення спеціальних конструкцій НВСП, а саме систем збудження (СЗ) в їх складі, що забезпечують наперед заданий розподіл ГВС в зоні контролю об'єкту є непростю проектною задачею, яку доцільно розв'язувати із використанням параметричного оптимального синтезу.

Серед можливих конструкцій СЗ виділяють гомогенні та гетерогенні структури збудження НВСП. Гомогенні структури містять або системи тільки кругових витків із радіусами r_{0i} , або тільки системи витків у вигляді рамок розмірами $a \times b$ із однаковою або різною висотою розташування відносно ОК. Тобто існує розмаїття варіантів структур СЗ, причому інтуїтивно не можна віддати перевагу ні одній із них. Кожен варіант СЗ потребує ретельного дослідження з точки зору можливості забезпечення апіорі заданого однорідного розподілу ГВС в зоні контролю об'єкта.

Ідея цілеспрямованої реалізації зондувальних властивостей електромагнітного поля (ЕМП), розглядається в роботах [1-4] і її втілення дає різноманітні конструктивні рішення СЗ з покращеними селективністю та чутливістю ВСП. Так в роботі [4] наведено детальний аналіз науково-технічної інформації щодо вихрострумовеого контролю з використанням ЕМП збудження з апіорі заданими властивостями та узагальнено підходи теоретичних досліджень в цьому напрямку. Проте в наявних дослідженнях головна увага зосереджувалася на нерухомих відносно ОК перетворювачах, що не вимагало необхідності синтезувати заданий розподіл ГВС в ОК. Для рухомих НВСП, що є характерним для автоматизованих процесів контролю, необхідно враховувати вклад струмів перенесення в розподіл ГВС. Постановка задачі щодо створення наперед заданого розподілу ГВС із врахуванням ефекту швидкості раніше дослідниками не розглядалася.

Перші спроби в цьому напрямку належать авторам [5], де запропоновано метод сурогатного нелінійного оптимального метаевристичного синтезу ОНВСП. Застосування технології сурогатної оптимізації дозволяє розв'язувати задачі оптимального синтезу з використанням метамоделей ВСП, які характеризуються високою обчислювальною продуктивністю. Створення апроксимаційних моделей (метамоделей, сурогатних моделей) НВСП, що з прийнятною точністю відтворюють багатовимірні в загальному випадку поверхні відгуку, є дуже важливим етапом методу, який визначає в кінцевому результаті успішність синтезу апіорі заданого однорідного розподілу ГВС в зоні контролю об'єкта.

Метою даних досліджень є створення універсального методу апроксимації гіперповерхонь відгуку НВСП із достатньою точністю, що є запорукою успішного розв'язку задач параметричного сурогатного синтезу перетворювачів з однорідною чутливістю в зоні контролю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

З'ясуємо наявні на даний час методи побудови метамоделей, які широко застосовуються науковцями для розв'язку різноманітних технічних задач. З літературних джерел вдалося виявити широке коло відомих підходів до побудови регресійних залежностей, кожен з яких має як переваги, так і недоліки, які необхідно враховувати при їх застосуванні [6-7]. Детальний аналіз цих методів міститься в оглядовій статті авторів [8]. Серед їх різновидів, зокрема поліноміальних, сплайн-апроксимацій, крігінг-метамоделей, регресійних RBF-моделей тощо, авторами перевага віддається евристичним метамоделям.

При створенні метамоделей для складних випадків топології гіперповерхонь відгуку широке застосування завдяки своїм універсальним апроксимаційним властивостям знаходять штучні нейронні мережі на радіально-базисних функціях RBF-ANN та багаточарових перцептронах MLP-ANN. Сформулюємо задачу багатовимірної

апроксимації математично для ряду структур СЗ НВСП у вигляді функціональних апроксимаційних залежностей розподілу ГВС. В табл. 1 наведено різновиди таких залежностей, де x та y є просторовими координатами на поверхні ОК в зоні контролю.

Планарна (пласка) кругова структура СЗ характеризується наявністю M котушок із радіусами r_{0i} ($i = 1...M$) із рівномірним $\Delta r = \text{const}$ або нерівномірним $\Delta r = \text{var}$ їх розташуванням, що знаходяться на одній висоті z_0 над ОК. Планарна рамкова структура СЗ розглядається аналогічною. На відміну від планарної структури СЗ для характеристики об'ємної додається ще один параметр, а саме, висота розташування котушок z_{0i} над ОК. Також слід відзначити, що табл. 1 так само містить інформацію щодо квадратних СЗ НВСП, які є окремим випадком прямокутної СЗ.

Таблиця 1.

Різновиди апроксимаційних залежностей розподілу ГВС ОНВСП

№	Структура СЗ НВСП	Геометрична форма СЗ	Функціональна апроксимаційна залежність ГВС
1	планарна	кругова	$\mathcal{F}=f(x, y, r_0)$
2	об'ємна		$\mathcal{F}=f(x, y, r_0, z_0)$
3	планарна	квадратна	$\mathcal{F}=f(x, y, a)$
		прямокутна	$\mathcal{F}=f(x, y, a, b)$
4	об'ємна	квадратна	$\mathcal{F}=f(x, y, a, z_0)$
		прямокутна	$\mathcal{F}=f(x, y, a, b, z_0)$
5	об'ємна	квадратна тангенціальна	$\mathcal{F}=f(x, y, a, b, x_0)$

Топологія багатовимірних поверхонь відгуку ГВС є вельми складною та не підлягає візуалізації. Тому задача створення методу апроксимації гіперповерхонь відгуку ГВС з достатньою точністю, тобто побудови метамоделей НВСП, є актуальною та заслуговує на увагу.

Створення апроксимацій гіперповерхонь відгуку виконується в декілька етапів: перший – характеристика взаємодії НВСП з ОК за допомогою «точної» електродинамічної математичної моделі; другий – побудова комп'ютерного плану обчислювального експерименту (КПЕ); третій – створення апроксимаційної моделі і завершальний етап – встановлення адекватності, інформативності та оцінювання точності отриманої апроксимаційної моделі.

Викладення основного матеріалу дослідження

Аналітичні функціональні залежності, тобто «точні» електродинамічні математичні моделі, що описують розподіл комплексних компонент магнітної індукції в середовищі ОК, отримані дослідниками в роботі [9] шляхом розв'язку крайових задач в частинних похідних з відповідними граничними умовами та припущеннями. Середовище вважалось лінійним, однорідним, ізотропним; ОК – струмопровідним, нескінченної ширини та довжини та кінцевої товщини d ; нескінченно тонкий рухомий зі швидкістю v відносно ОК виток СЗ розміщується на висоті z_0 над ОК та живиться змінним струмом I круговою частотою ω ; електрична провідність σ , відносна магнітна проникність μ_r матеріалу ОК і швидкість руху перетворювача $\vec{v} = (v_x, v_y, 0)$ є сталими.

Тоді математична модель розподілу ГВС в ОК визначається через частинні похідні складових магнітної індукції B_x, B_y, B_z за просторовими координатами:

$$J_x = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \left[\frac{\partial}{\partial y} \left[j \cdot \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I}{8 \cdot \pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\xi^2 + \eta^2}{\eta \cdot \gamma \cdot (1 - e^{-2\gamma d})} \cdot \left[\left\{ -(1 + \lambda_0) \cdot e^{-2\gamma d} + v_0 \cdot e^{(\gamma - \sqrt{\xi^2 + \eta^2})d} \right\} \cdot e^{\gamma z} - \left\{ 1 + \lambda_0 - v_0 \cdot e^{(\gamma - \sqrt{\xi^2 + \eta^2})d} \right\} \cdot e^{-\gamma z} \right] \cdot e^{-j(x \cdot \xi + y \cdot \eta)} \cdot e^{-z_0 \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot S(\xi, \eta) d\xi d\eta \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I}{8 \cdot \pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(1 - e^{-2\gamma d})} \cdot \left[\left\{ -(1 + \lambda_0) \cdot e^{-2\gamma d} + v_0 \cdot e^{(\gamma - \sqrt{\xi^2 + \eta^2})d} \right\} \cdot e^{\gamma z} + \left\{ 1 + \lambda_0 - v_0 \cdot e^{(\gamma - \sqrt{\xi^2 + \eta^2})d} \right\} \cdot e^{-\gamma z} \right] \cdot e^{-j(x \cdot \xi + y \cdot \eta)} \cdot e^{-z_0 \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot S(\xi, \eta) d\xi d\eta \right] \right] \quad (1)$$

$$J_y = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \left[\frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I}{8 \cdot \pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\xi}{\eta \cdot (1 - e^{-2\gamma d})} \cdot \left[\left\{ -(1 + \lambda_0) \cdot e^{-2\gamma d} + v_0 \cdot e^{(\gamma - \sqrt{\xi^2 + \eta^2})d} \right\} \cdot e^{\gamma z} + \left\{ 1 + \lambda_0 - v_0 \cdot e^{(\gamma - \sqrt{\xi^2 + \eta^2})d} \right\} \cdot e^{-\gamma z} \right] \cdot e^{-j(x \cdot \xi + y \cdot \eta)} \cdot e^{-z_0 \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot S(\xi, \eta) d\xi d\eta \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left[j \cdot \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I}{8 \cdot \pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\xi^2 + \eta^2}{\eta \cdot \gamma \cdot (1 - e^{-2\gamma d})} \cdot \left[\left\{ -(1 + \lambda_0) \cdot e^{-2\gamma d} + v_0 \cdot e^{(\gamma - \sqrt{\xi^2 + \eta^2})d} \right\} \cdot e^{\gamma z} - \left\{ 1 + \lambda_0 - v_0 \cdot e^{(\gamma - \sqrt{\xi^2 + \eta^2})d} \right\} \cdot e^{-\gamma z} \right] \cdot e^{-j(x \cdot \xi + y \cdot \eta)} \cdot e^{-z_0 \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot S(\xi, \eta) d\xi d\eta \right] \right] \quad (2)$$

де $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнітна постійна у вакуумі; $j = \sqrt{-1}$;

$$\gamma = \sqrt{\xi^2 + \eta^2 - j \cdot \sigma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot (v_x \cdot \xi + v_y \cdot \eta) + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r};$$

$$\lambda_0 = \frac{\{\gamma^2 - \mu_r^2 \cdot (\xi^2 + \eta^2)\} \cdot (1 - e^{-2\gamma d})}{(\gamma + \mu_r \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2})^2 - (\gamma - \mu_r \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2})^2 \cdot e^{-2\gamma d}};$$

$$v_0 = \frac{4 \cdot \mu_r \cdot \gamma \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \cdot e^{(\sqrt{\xi^2 + \eta^2} - \gamma)d}}{(\gamma + \mu_r \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2})^2 - (\gamma - \mu_r \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2})^2 \cdot e^{-2\gamma d}};$$

де $S(\xi, \eta)$ – функція форми витка СЗ;

ξ, η – змінні інтегрування.

У виразах (1), (2) функції форми котушки $S(\xi, \eta)$ для кругових і рамкових НВСП є різними [9].

Побудова метамоделі із застосуванням штучних нейронних мереж (НМ) передбачає процедуру навчання на масиві даних, які отримуються розрахунком за «точними» математичними моделями. Тому цілком логічним є створення ефективного ПЕ, вибір якого суттєво впливає на точність апроксимаційної моделі. Оскільки топологія

гіперповерхні відгуку ГВС є складною, тому доцільно застосовувати неklasичні методи планування експерименту, а саме комп'ютерні методи заповнення багатовимірного простору пошуку опорними точками. КПЕ найкраще забезпечують відтворення глобальної та локальної поведінки багатовимірної поверхні відгуку. Зважаючи на апіорну невизначеність топології необхідно рівномірно заповнювати гіперпаралелепіпед області пошуку точками, що збільшує ймовірність їх потрапляння в області екстремумів чи перегинів гіперповерхні відгуку.

На сьогодні добре розроблена теорія генерування одновимірних квазівипадкових розширюваних послідовностей, що мають низькі показники розбіжності [10-11]. Як було показано в роботі [12], побудова КПЕ суттєво ускладнюється, якщо розмірність простору більше ніж три. Тобто виникає необхідність додаткових досліджень щодо оптимізованого вибору, так званих, базисних параметрів послідовності та в роботі [12] проведено такі дослідження стосовно ЛП_τ-послідовностей Соболя. В результаті дослідження встановлено ряд комбінацій ЛП_τ-послідовностей для три-, чотири- та п'ятивимірних планів, які мають найкращі показники гомогенності. Також для ПЕ для багатовимірного факторного простору доцільно застосовувати сукупності безпараметричних адитивних рекурсивних одновимірних R-послідовностей [13]. Багатовимірні ПЕ на основі цих послідовностей мають прийнятні, хоча й не найкращі, характеристики гомогенності у порівнянні із ПЕ на ЛП_τ-послідовностях, проте не потребують додаткових досліджень щодо оцінки їх якості. Тому при створенні багатовимірних апроксимаційних моделей для різних варіантів структур збудження НВСП авторами використовуються багатовимірні КПЕ на основі квазівипадкових безпараметричних адитивних R-послідовностей Кронекера з використанням ірраціональних чисел, які своєю чергою отримані на базі узагальненої послідовності Фібоначчі, та комбінації ЛП_τ-послідовностей Соболя з найкращими показниками центрального та циклічного розходжень.

Розглянемо детально на прикладах особливості застосування нейромережових технологій для створення багатопараметричних апроксимаційних моделей гіперповерхонь НВСП, що мають прийнятні показники точності. При цьому необхідно зауважити, що якість всіх створених багатовимірних апроксимаційних моделей, які розглядаються нижче, обов'язково оцінюється комплексом статистичних показників: коефіцієнтом детермінації R^2 ; відношенням стандартних відхилень $S.D.ratio$; середньою відносною величиною модельної похибки $MAPE, \%$; сумою квадратів залишків SS_R ; середнім квадратом залишків MS_R . Також для візуального аналізу результатів та їх кращого сприйняття використовується графічне представлення у вигляді гістограм відносних похибок та діаграм розсіювання.

В роботі [14] розглянутий найпростіший випадок побудови апроксимаційної моделі для кругового НВСП з планарною структурою СЗ при варіюванні трьох параметрів $\mathcal{F} = f(x, y, r_0)$. Отримані результати показують неможливість досягнення необхідної точності апроксимаційної моделі за допомогою глобальної одинарної RBF-ANN мережі. І тільки застосування комітетів НМ із прийняттям рішення усередненням по ансамблю з процедурою підсилення *boosting* дозволило отримати задовільну точність апроксимації.

Значно покращити точність цієї апроксимаційної моделі вдалося застосуванням гібридного підходу, коли одночасно використовується технологія декомпозиції області пошуку та НМ, побудованих на техніках асоціативних машин із різними методами отримання рішення. Так в роботі [5] запропоновано використовувати адитивну НМ-регресію [8] з декомпозицією простору пошуку та усередненням по ансамблю. Для отримання прийнятної $MAPE, \%$ на рівні 4,78 % - 6,76 % виявилось достатнім розбиття простору на три підобласті по радіусу витка СЗ та для кожної з отриманих підобластей

застосування адитивної НМ-регресії з усередненням по ансамблю на останньому рівні апроксимації та підсиленням (boosting). Підсилення здійснювалося шляхом формування підвбірок з використанням процедури бегінг. Для візуалізації отриманих результатів апроксимації багатовимірної поверхні відгуку застосовано зрізи та узагальнені зрізи гіперповерхні. На рис. 1 а показано результат відновлення розподілу ГВС у вигляді ліній рівня для зрізу гіперповерхні відгуку ($r_0 = 14,7$ мм, $z_0 = 3$ мм), отриманий за допомогою апроксимаційної моделі із застосуванням адитивної НМ-регресії.

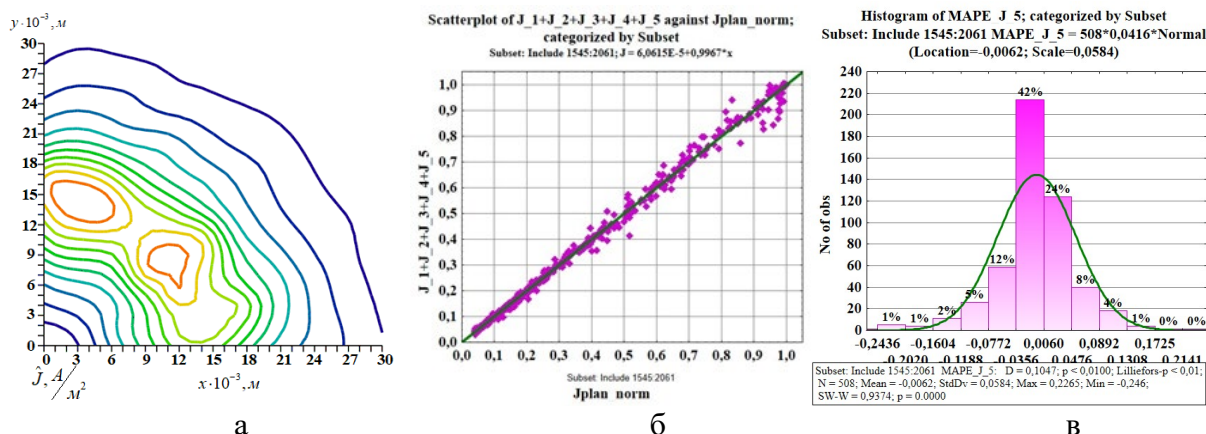


Рис. 1 Відновлення поверхні відгуку за допомогою апроксимаційної моделі на основі адитивної НМ-регресії для НВСП з планарною структурою СЗ: а) лінії рівня для зрізу поверхні $r = 14.7 \text{ мм} \cup z_0 = 3 \text{ мм}$; б) діаграма розсіювання для узагальненого зрізу $14 < r \leq 15 \text{ мм}$; в) гістограма розподілу відносної модельної похибки апроксимації гіперповерхні відгуку

Надалі зупинимося на складнішому прикладі апроксимаційної задачі для кругового рухомого НВСП $\mathcal{F} = f(x, y, r_0, z_0)$, що є характерною для об'ємної структури СЗ [15]. Внаслідок нерегулярної поведінки гіперповерхні відгуку ГВС в цьому випадку виконується декомпозиція області пошуку як по висоті розташування СЗ перетворювача, так і по радіусу її складових. В кожній області декомпозиції кількість точок КПЕ задається індивідуально. Завдяки цьому вдається досягти певного компромісу між точністю побудови апроксимаційної моделі і мінімальною кількістю точок $N_{навч}$. КПЕ. Для цього випадку, щоб забезпечити необхідну точність, виявилось недостатньо реалізувати запропонований вище підхід. Тому декомпозиція області пошуку здійснена як за висотою розташування перетворювача над ОК, так і за радіусами котушки. Адитивна НМ-регресія ускладнена, а саме на проміжних її рівнях застосовано комітети НМ із тих мереж, продуктивність яких не менша, ніж 95%. Використаний прийом забезпечує прийнятну похибку $MAPE, \%$ на етапі навчання НМ, яка змінюється від 4,35% до 14,87% та від 5,41% до 24,76% – на етапі відтворення гіперповерхні відгуку.

Для перевірки якості отриманої багатопараметричної апроксимаційної моделі виконується відтворення гіперповерхні відгуку у всіх декомпозиційних областях та оцінюється її адекватність та інформативність за сукупністю статистичних показників. На рис. 2 а наведено результати відновлення поверхні відгуку для НВСП з об'ємною структурою СЗ, отримані за допомогою створеної багатовимірної апроксимаційної моделі, що виконано у всьому діапазоні варіації змінних на значно більшій кількості точок, ніж використовувалося на етапі навчання ($N_{відтв.} > N_{навч}$). Чисельні значення $MAPE, \%$, отримані для одного із випадків узагальненого зрізу гіперповерхні відгуку $6 \leq r \leq 7 \text{ мм}$, що розташовані на висотах $3 \leq z_0 \leq 4 \text{ мм}$ на етапах

навчання НМ-моделі відповідно складають 9,56 % та відтворення 11,33 %. В табл. 2 наведено значення *MAPE*,% для декомпозиційної підобласті по висоті $3 < z \leq 4$ мм.

Діаграми розсіювання значень чотиривимірної апроксимаційної функції на етапі відтворення для декомпозиційної підобласті ($3 \leq z_0 \leq 4$ мм) U ($6 \leq r \leq 7$ мм) представлено на рис. 2 б, а гістограми розподілу відносної модельної похибки апроксимації гіперповерхні відгуку для цієї ж підобласті – на рис. 2 в.

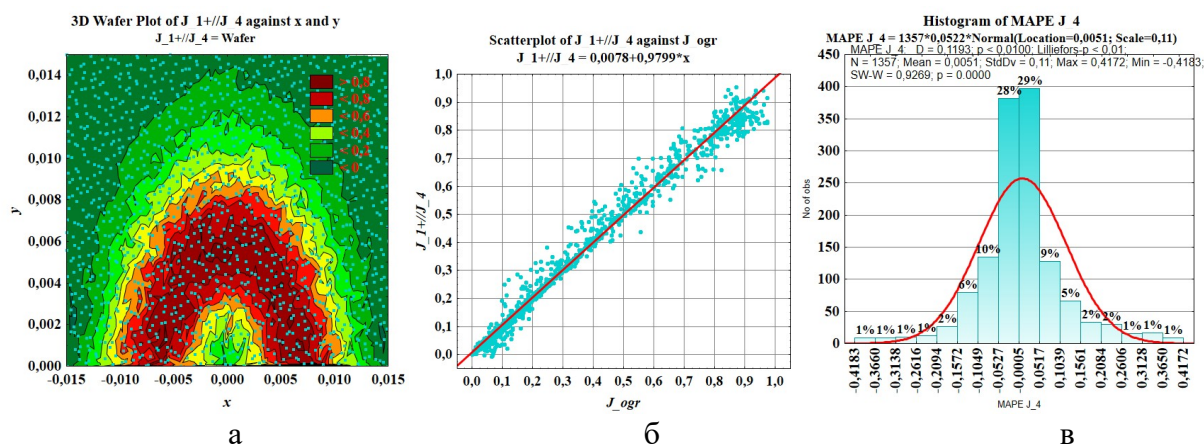


Рис. 2 Відновлення поверхні відгуку узагальненого зрізу ($3 \leq z_0 \leq 4$ мм) U ($6 \leq r \leq 7$ мм) за допомогою апроксимаційної моделі для кругового рухомого НВСП з об’ємною структурою СЗ: а) лінії рівня; б) діаграма розсіювання; в) гістограма розподілу відносної модельної похибки апроксимації гіперповерхні відгуку

Таблиця 2.

Оцінка якості багатопараметричної апроксимаційної моделі кругового рухомого НВСП з об’ємною структурою СЗ для декомпозиційної підобласті по висоті $3 < z \leq 4$ мм

Позначення підобласті	Області декомпозиції, мм	$N_{навч.}/N_{відтв.}$	<i>MAPE</i> ,%	
			Етап навчання	Етап відтворення
I _r	$2 \leq r \leq 3$	900/1800	4.35	6.22
II _r	$3 < r \leq 5$	1295/2500	6.66	10.04
III _r	$5 < r \leq 8$	2089/4153	9.51	12.76
IV _r	$8 < r \leq 10$	1504/2900	12.68	19.74
V _r	$10 < r \leq 12$	1428/2600	9.42	14.8
VI _r	$12 < r \leq 15$	2518/4050	14.67	20.57

Аналогічний підхід застосовано для побудови метамоделі рухомого рамкового НВСП з планарною структурою СЗ (квадратна форма витка). При цьому область пошуку по лінійному розміру витка a розділялася на шість підобластей. Для отримання прийняттого результату *MAPE*,% апроксимаційної моделі від 7,97 % до 14,91 % (рис. 3) використовувалося усереднення за ансамблем НМ на кожному рівні адитивної НМ-регресії для всіх шести декомпозиційних підобластей.

Створені таким чином апроксимаційні моделі застосовуються в процедурі сурогатного оптимального параметричного синтезу, що дозволяє продуктивно з мінімальними витратами часу здійснювати проектування НВСП з СЗ будь-якої складності. Також вони слугують для попередньої оцінки якості отриманого розв’язку (рис. 4) з метою відбору найкращих рішень для подальшого відтворення поверхні відгуку за «точною» математичною моделлю.

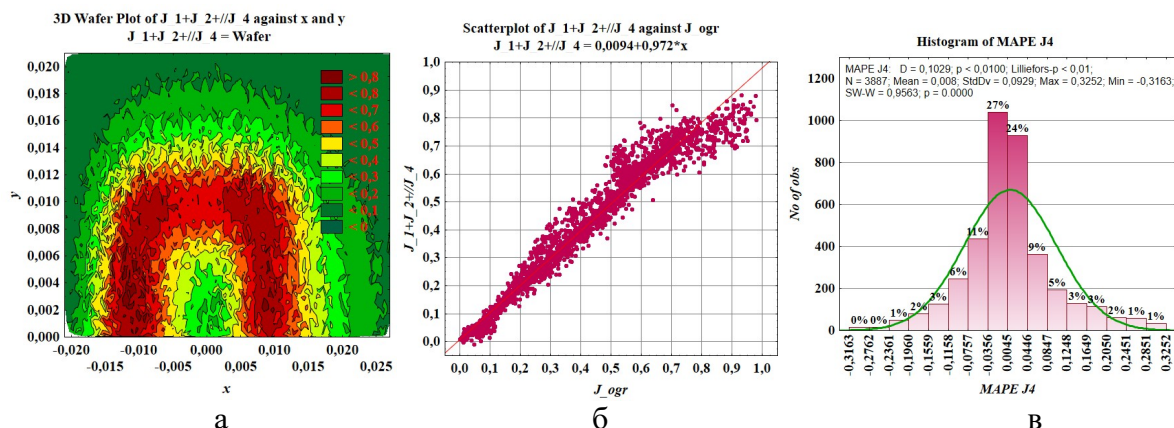


Рис. 3 Відновлення поверхні відгуку для узагальненого зрізу $9 \leq a \leq 11$ мм за допомогою апроксимаційної моделі для рамкового рухомого НВСП з планарною структурою СЗ:
 а) лінії рівня; б) діаграма розсіювання; в) гистограма розподілу відносної модельної похибки

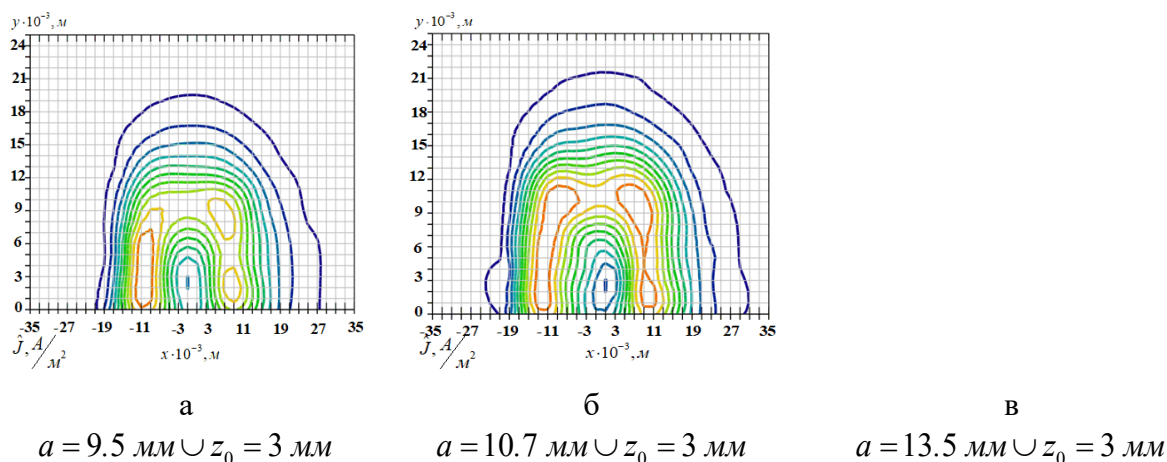


Рис. 4 Відновлення поверхні відгуку за допомогою створеної апроксимаційної моделі для рамкового рухомого НВСП з планарною структурою СЗ, що представлено лініями рівня розподілу ГВС для деяких зрізів

Висновки

Отже, в роботі запропонована та на прикладах продемонстрована універсальна методологія побудови багатовимірних апроксимаційних (сурогатних) моделей НВСП різноманітних структур СЗ. Вона полягає в поетапному виконанні певних взаємопов'язаних задач. КПЕ для багатовимірного факторного простору пропонується реалізовувати на основі сукупності безпараметричних адитивних рекурсивних одновимірних R_d -послідовностей та комбінацій ЛП $_r$ -послідовностей Соболя, що мають найкращі показники розбіжності. Їх використання найкраще забезпечує відтворення глобальної та локальної поведінки багатовимірної поверхні відгуку. Для побудови багатовимірних апроксимаційних моделей, зважаючи на суттєву нелінійність та нерегулярну поведінку гіперповерхонь відгуку використано гібридний підхід, що передбачає одночасне застосування технологій декомпозиції області пошуку та НМ, які побудовані на техніках асоціативних машин, а також адитивної НМ-регресії. Для підвищення точності адитивної НМ-регресії використано декілька методів – це усереднення по ансамблю НМ та підсилення шляхом формування підвибірок (бегінг). Внаслідок таких дій та шляхом ускладнення структурних особливостей адитивної НМ-регресії, а саме застосуванням комітетів НМ на останньому або кожному проміжному рівні апроксимації вдалося досягти прийнятної похибки $MAPE, \%$ багатовимірних метамоделей НВСП.

Список використаної літератури

1. Ida N., Meyendorf N. Handbook of advanced non-destructive evaluation. Springer. 2019. 1626 p.
2. Su Z., Efremov A., Safdarnejad M., Tamburrino A., Udpa L., Udpa S. Optimization of coil design for near uniform interrogating field generation. *AIP Conference Proceedings*. 2015. Vol. 1650. P. 405–413.
3. Repelianto A. S., Kasai N. The improvement of flaw detection by the configuration of uniform eddy current probes. *Sensors*. 2019. Vol. 19, No 2. Article № 397.
4. Halchenko V. Ya., Trembovetskaya R. V., Tychkov V. V. Surface eddy current probes: excitation systems of the optimal electromagnetic field (review). *Devices and Methods of Measurements*. 2020. Vol. 11. No. 2. P. 91–104.
5. Halchenko V. Ya., Trembovetska R. V., Tychkov V. V., Storchak A. V. Nonlinear surrogate synthesis of the surface circular eddy current probes. *Przegląd elektrotechniczny*. 2019. No 9. P. 76-82.
6. Friedman J. Multivariate adaptive regression splines (with discussion). *Annals of Statistics*, 1991. No. 19. P. 1–141.
7. Fang H., Horstemeyer M. F. Global response approximation with radial basis functions. *Engineering optimization*. 2006. Vol. 38, No. 4, P 407–424.
8. Гальченко В. Я., Трембовецька Р. В., Тичков В. В., Сторчак А. В. Методи створення метамоделей: стан питання. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. Т. 151, № 4. С. 74 – 88.
9. Itaya T., Ishida K., Kubota Y., Tanaka A., Takehira N. Visualization of Eddy Current Distributions for Arbitrarily Shaped Coils Parallel to a Moving Conductor Slab. *Progress In Electromagnetics Research M*. 2016. Vol. 47. P. 1-12. DOI:<https://doi.org/10.2528/PIERM16011204>.
10. Santner T. J., Williams B. J., Notz W. I. The Design and Analysis of Computer Experiments. New York : Springer (Springer series in statistics); 2nd ed. 2018. 446 p.
11. Random and Quasi-Random Point Sets / P. Hellekalek, G. Larcher, J. Beck and others. Springer: (Lecture notes in statistics 138); 1st ed. 1998 edition (9 October 1998). 334 p.
12. Halchenko V. Ya., Trembovetska R. V., Tychkov V. V., Storchak A. V. The Construction of Effective Multidimensional Computer Designs of Experiments Based on a Quasi-random Additive Recursive R_d -sequence. *Applied Computer Systems*. 2020. Vol. 25, No. 1. P. 70-76
13. Roberts M. The unreasonable effectiveness of quasirandom sequences. - May 2018. - [online] <http://extremelearning.com.au/unreasonable-effectiveness-of-quasirandom-sequences/>.
14. Halchenko V. Ya., Trembovetska R. V., Tychkov V. V., Development of excitation structure RBF-metamodels of moving concentric eddy current probe. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2019. No. 1, P. 28-38.
15. Гальченко В. Я., Трембовецька Р. В., Тичков В. В. Синтез вихрострумівих перетворювачів з об'ємною структурою системи збудження, що реалізує однорідну чутливість в зоні контролю. *Технічна електродинаміка*. 2021. №. 3. С. 10–18.

References

1. Ida, N. & Meyendorf, N. (2019). Handbook of advanced non-destructive evaluation. Springer.
2. Su, Z., Efremov, A., Safdarnejad, M., Tamburrino, A., Udpa, L. & Udpa, S. (2015). Optimization of coil design for near uniform interrogating field generation. *AIP Conference Proceedings*. **1650**, 405–413.

3. Repelianto, A. S. & Kasai, N. (2019). The improvement of flaw detection by the configuration of uniform eddy current probes. *Sensors*. **19**, 2. Article № 397.
4. Halchenko, V. Ya., Trembovetskaya, R. V. & Tychkov, V. V. (2020). Surface eddy current probes: excitation systems of the optimal electromagnetic field (review). *Devices and Methods of Measurements*. **11**, 2, 91–104.
5. Halchenko, V. Ya., Trembovetska, R. V., Tychkov, V. V. & Storchak, A. V. (2019). Nonlinear surrogate synthesis of the surface circular eddy current probes. *Przeegląd elektrotechniczny*. **9**, 76-82.
6. Friedman, J. (1991). Multivariate adaptive regression splines (with discussion). *Annals of Statistics*. **19**, 1–141.
7. Fang, H. & Horstemeyer, M. F. (2006). Global response approximation with radial basis functions. *Engineering optimization*. **38**, 4, 407–424.
8. Halchenko M V. Ya., Trembovetska M R. V., Tychkov M V. V. & Storchak A. V. (2020). Methods for Creating Metamodels: State of the Question. *Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*. **151**, 4, 74 – 88.
9. Itaya, T., Ishida, K., Kubota, Y., Tanaka, A. & Takehira, N. (2016). Visualization of Eddy Current Distributions for Arbitrarily Shaped Coils Parallel to a Moving Conductor Slab. *Progress In Electromagnetics Research M*. **47**, 1-12.
10. Santner, T. J., Williams, B. J. & Notz, W. I. (2018). The Design and Analysis of Computer Experiments. New York : Springer (Springer series in statistics); 2nd ed. 446.
11. Hellekalek, P., Larcher, G., Beck, J. and others (1998). Random and Quasi-Random Point Sets. Springer: (Lecture notes in statistics 138); 1st ed.
12. Halchenko, V. Ya., Trembovetska, R. V., Tychkov, V. V. & Storchak, A. V. (2020). The Construction of Effective Multidimensional Computer Designs of Experiments Based on a Quasi-random Additive Recursive Rd–sequence. *Applied Computer Systems*. **25**, 1, 70-76.
13. Roberts, M. (2018). The unreasonable effectiveness of quasirandom sequences. [online] <http://extremelearning.com.au/unreasonable-effectiveness-of-quasirandom-sequences/>.
14. Halchenko, V. Ya., Trembovetska, R. V. & Tychkov, V. V. (2019). Development of excitation structure RBF-metamodels of moving concentric eddy current probe. *Electrical Engineering & Electromechanics*. **1**. 28-38.
15. Halchenko, V. Ya., 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.

Гальченко Володимир Якович - д.т.н., професор, професор кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету. E-mail: halchvl@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0304-372X.

Трембовецька Руслана Володимирівна - к.т.н., доцент, доцент кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету, E-mail: r.trembovetska@chdtu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2308-6690.

Тичков Володимир Володимирович - к.т.н., доцент кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету, E-mail: v.tychkov@chdtu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9997-307X.