

[0000-0002-2308-6690] **Р. В. Трембовецька**, к.т.н., доцент,

e-mail: r.trembovetska@chdtu.edu.ua

[0000-0003-0304-372X] **В. Я. Гальченко**, д.т.н., професор,

[0000-0001-9997-307X] **В. В. Тичков**, к.т.н., доцент

Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ЛІНІЙНИЙ СУРОГАТНИЙ СИНТЕЗ РАМКОВИХ ТАНГЕНЦІАЛЬНИХ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ОБ'ЄМНОЮ СТРУКТУРОЮ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ

Запропоновано математичний метод лінійного сурогатного параметричного синтезу рухомих рамкових тангенціальних накладних вихрострумових перетворювачів з однорідним розподілом густини вихрових струмів у зоні контролю об'єкта. Побудовано метамодель рамкового вихрострумового перетворювача з об'ємною структурою системи збудження. Прийнятну точність створеної метамоделі отримано шляхом застосування асоціативних нейронних мереж із методами підвищення точності та декомпозиції простору пошуку. Наведено чисельні результати і графічний матеріал, який ілюструє адекватність та інформативність отриманої метамоделі. Розглянуто приклади синтезу систем збудження із використанням сучасних метаевристичних стохастичних алгоритмів пошуку глобального екстремуму. Наведено чисельні результати отриманого розв'язку і графічний ілюстративний матеріал розподілу густини вихрових струмів на поверхні в зоні контролю об'єкта.

Ключові слова: рамкове джерело електромагнітного поля, густина вихрових струмів, рівномірна чутливість, електродинамічна модель, метамодель, адитивна нейромережева регресія.

Вступ. Створення однорідного поля збудження, що сприяє впевненому виявленню дефектів і визначенню їх геометричних параметрів засобами вихрострумового контролю, є актуальною та водночас складною проблемою. Широкий загаль науковців досліджує вихрострумові перетворювачі, які мають електромагнітне поле (ЕМП) із заздалегідь визначеною топологією, що дає змогу покращити їх селективність і чутливість [1-3]. Детальний огляд науково-технічної інформації щодо використання ЕМП збудження із наперед заданими властивостями наведено в роботі [4], де розглянуто низку робіт, в яких висвітлено результати досліджень, коли лінійним або нелінійним синтезом досягається однорідний розподіл ЕМП на поверхні нерухомого об'єкта контролю (ОК).

В результаті проведеного аналізу встановлено практично повну відсутність відомостей про вирішення проблеми створення накладних вихрострумових перетворювачів (НВСП) із рівномірною чутливістю для рухомих ОК, що вимагає побудови систем збудження (СЗ) ЕМП, які забезпечують однорід-

ний розподіл густини вихрових струмів (ГВС) в ОК з урахуванням ефекту швидкості.

Необхідно відзначити, що в цьому напрямі авторами виконано низку досліджень стосовно кругових та рамкових НВСП. Так, у роботах авторів [5-8] висвітлено результати синтезу стосовно рухомих кругових НВСП із планарною структурою СЗ. В цих роботах розглядалися СЗ, в яких секційні котушки розташовувалися на одній висоті z_0 над ОК із рівномірним і нерівномірним розміщенням секцій вздовж радіуса. Процедура лінійного синтезу полягала у визначенні параметрів магніторушійної сили (МРС) I_m кожної котушки, тоді як для нелінійного – визначалися радіуси котушок та МРС. Для планарної структури СЗ із круговими секційними котушками значення приведеної похибки однорідності густини вихрових струмів у зоні контролю становило від 9 до 12 %, що є задовільним результатом.

Крім того, існують дослідження кругових НВСП [9, 10], що мають об'ємну гомогенну структуру СЗ із як рівномірним, так і нерівномірним розташуванням секцій. Для

розв'язку такої задачі синтезу попередньо створено багатопараметрову метамодель ВСП $\hat{J}=f(x, y, r, z_0)$, особливості побудови якої розглянуто в роботі [9]. Отримані результати чисельних експериментів демонструють переваги синтезованих об'ємних структур СЗ порівняно з планарними щодо забезпечення вимог однорідності.

Разом з тим, відомі рамкові НВСП, системи збудження яких розташовані паралельно чи перпендикулярно до ОК. Тангенціальні НВСП вважаються кращими при виявленні дефектів типу розшарувань [1]. Результати лінійного синтезу рамкових НВСП планарної структури СЗ наведено в роботі [11].

Однак серед класу рамкових НВСП залишаються недослідженими перетворювачі з об'ємною структурою СЗ та вертикальним розташуванням його відносно ОК. Тому доцільно дослідити рамковий тангенціальний НВСП із такою структурою СЗ як перспективний в сенсі можливості забезпечення апіорі заданого однорідного розподілу ГВС в зоні контролю.

Мета роботи: створення методу лінійного сурогатного синтезу рамкового тангенціального НВСП із об'ємною структурою СЗ та рівномірною чутливістю в зоні контролю, що забезпечується застосуванням стохастичного алгоритму пошуку екстремуму.

Виклад основного матеріалу дослідження

«Точна» модель прямої електродинамічної задачі. Сформульована мета вимагає розв'язання низки задач, а саме: опису «точними» математичними моделями розподілу

ГВС у зоні контролю, що створюється рухомих тангенціальним НВСП; створення метамоделі рамкового тангенціального НВСП з урахуванням ефекту швидкості з застосуванням комп'ютерних планів експерименту; реалізації лінійного сурогатного синтезу щодо створення НВСП з об'ємною структурою СЗ, що забезпечує рівномірну чутливість в зоні контролю.

Для розв'язку першої задачі, насамперед, розглядається джерело збудження ЕМП, яке складається з одинарного витка прямокутної форми, що розташований вертикально до ОК. Прямокутний виток із розмірами $2a \times 2b$ живиться змінним струмом I частотою ω та розташований на висоті z_0 над ОК, яка збігається з його геометричним центром. Досліджуваний об'єкт товщиною d має постійні питому електричну провідність σ та магнітну проникність μ_r . Середовище вважається лінійним, ізотропним і однорідним. Швидкість переміщення витка $\vec{v}=(v_x, v_y, 0)$ відносно ОК є постійною.

Взаємодія джерела поля у вигляді одинарного витка з ОК описується співвідношеннями комплексних складових магнітної індукції за просторовими координатами B_x, B_y, B_z , які отримані в результаті розв'язку диференціальних рівнянь Максвелла [12-14] за умови неперервності тангенціальних $H_{1t} = H_{2t}$ і нормальних $B_{1n} = B_{2n}$ складових поля на границях розділу середовищ. Тоді «точна» математична модель розподілу ГВС всередині ОК визначається через частинні похідні складових магнітної індукції за просторовими координатами x, y, z :

$$J_x = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \left[\frac{\partial}{\partial y} \left[-j \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I}{4 \cdot \pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\xi \cdot e^{(jx_0 - \xi)} \cdot \sin(b \cdot \eta)}{\gamma \cdot \eta} \cdot \left[\left\{ -(1 + \lambda_0) \cdot e^{2 \cdot \gamma \cdot d} + v_0 \cdot e^{-\left(\sqrt{\xi^2 + \eta^2} - \gamma\right) \cdot d} \right\} \cdot e^{\gamma \cdot z} - \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - \left\{ 1 + \lambda_0 - v_0 \cdot e^{-\left(\sqrt{\xi^2 + \eta^2} - \gamma\right) \cdot d} \right\} \cdot e^{-\gamma \cdot z} \right] \cdot e^{-z_0 \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot \left(e^{a \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} - e^{-a \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \right) \cdot e^{-j(x \cdot \xi + y \cdot \eta)} d\xi d\eta \right] - \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial z} \left[- \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I}{4 \cdot \pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\xi \cdot e^{(jx_0 - \xi)} \cdot \sin(b \cdot \eta)}{(\xi^2 + \eta^2)} \cdot \left[\left\{ -(1 + \lambda_0) \cdot e^{2 \cdot \gamma \cdot d} + v_0 \cdot e^{-\left(\sqrt{\xi^2 + \eta^2} - \gamma\right) \cdot d} \right\} \cdot e^{\gamma \cdot z} + \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \left\{ 1 + \lambda_0 - v_0 \cdot e^{-\left(\sqrt{\xi^2 + \eta^2} - \gamma\right) \cdot d} \right\} \cdot e^{-\gamma \cdot z} \right] \cdot e^{-z_0 \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot \left(e^{a \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} - e^{-a \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \right) \cdot e^{-j(x \cdot \xi + y \cdot \eta)} d\xi d\eta \right] \right] \quad (1)$$

$$J_y = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \left[\frac{\partial}{\partial z} \left[-\frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I}{4 \cdot \pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\xi^2 \cdot e^{(jx_0 \cdot \xi)}}{\eta \cdot (\xi^2 + \eta^2)} \cdot \frac{\sin(b \cdot \eta)}{(1 - e^{2 \cdot \gamma \cdot d})} \cdot \left[\left\{ -(1 + \lambda_0) \cdot e^{2 \cdot \gamma \cdot d} + \nu_0 \cdot e^{-\left(\sqrt{\xi^2 + \eta^2} - \gamma\right) \cdot d} \right\} \cdot e^{\gamma \cdot z} + \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \left\{ 1 + \lambda_0 - \nu_0 \cdot e^{-\left(\sqrt{\xi^2 + \eta^2} - \gamma\right) \cdot d} \right\} \cdot e^{-\gamma \cdot z} \right] \cdot e^{-z_0 \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot \left(e^{a \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} - e^{-a \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \right) \cdot e^{-j(x \cdot \xi + y \cdot \eta)} d\xi d\eta \right] - \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial x} \left[j \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I}{4 \cdot \pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\xi \cdot e^{(jx_0 \cdot \xi)}}{\gamma \cdot \eta} \cdot \frac{\sin(b \cdot \eta)}{(1 - e^{2 \cdot \gamma \cdot d})} \cdot \left[\left\{ -(1 + \lambda_0) \cdot e^{2 \cdot \gamma \cdot d} + \nu_0 \cdot e^{-\left(\sqrt{\xi^2 + \eta^2} - \gamma\right) \cdot d} \right\} \cdot e^{\gamma \cdot z} - \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - \left\{ 1 + \lambda_0 - \nu_0 \cdot e^{-\left(\sqrt{\xi^2 + \eta^2} - \gamma\right) \cdot d} \right\} \cdot e^{-\gamma \cdot z} \right] \cdot e^{-z_0 \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot \left(e^{a \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} - e^{-a \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \right) \cdot e^{-j(x \cdot \xi + y \cdot \eta)} d\xi d\eta \right] \right] \quad (2)$$

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

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

$$\nu_0 = \frac{4 \cdot \mu_r \cdot \gamma \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \cdot e^{\left(\sqrt{\xi^2 + \eta^2} - \gamma\right) \cdot d}}{(\gamma + \mu_r \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2})^2 - (\gamma - \mu_r \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2})^2 \cdot e^{-2 \cdot \gamma \cdot d}}$$

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнітна стала у вакуумі;

$j = \sqrt{-1}$; ξ, η – змінні інтегрування.

Розподіл ГВС, отриманий за допомогою «точної» математичної моделі (1), (2), для одинарного рамкового витка зображено на рисунку 1. Розрахунок здійснювався за наступних вихідних даних: $v = (0; 40; 0) \text{ м/с}$; $x = -15 \dots 15 \text{ мм}$, $y = -25 \dots 25 \text{ мм}$, $a = 16 \text{ мм}$, $b = 16 \text{ мм}$; товщина струмопровідного матеріалу $d = 10 \text{ мм}$; висота розташування центру витка над ОК $z_0 = 19 \text{ мм}$; зміщення витка від початку координат $x_0 = 0 \text{ мм}$; електрофізичні параметри матеріалу ОК $\sigma = 7,69 \cdot 10^6 \text{ См/м}$, $\mu_r = 700$, частота $f = 4 \text{ кГц}$; струм збудження $I = 1 \text{ А}$.

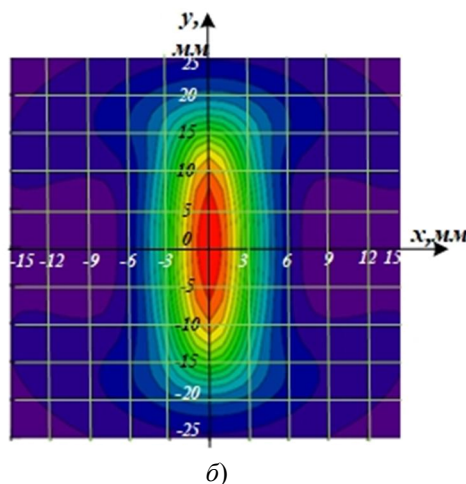
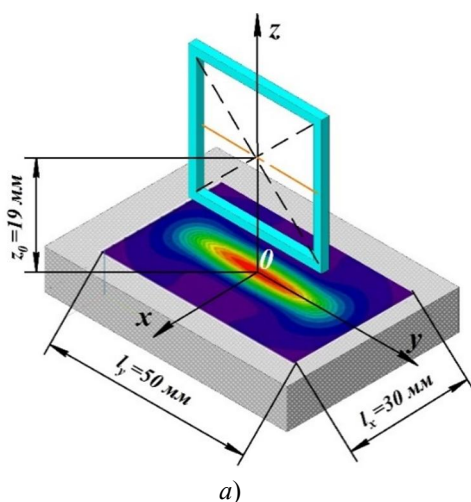


Рисунок 1 – Розподіл ГВС на поверхні ОК, створений одинарним витком прямокутної форми

Для задач дефектометрії ідеальною формою розподілу ГВС є П-подібна, коли спостерігається максимальна його локалізація і сконцентрованість у зоні контролю, тоді як поза її межами розподіл має нульове значення. Тобто розподіл ГВС є однорідним у заданій зоні. На рисунку 2 проілюстровано заданий П-подібний розподіл ГВС в ОК J_{ref} , що описується виразом

$$J_{ref} = \begin{cases} 2,4 \cdot 10^4 \cdot \text{А/м}^2 & \text{при } \begin{cases} 0 < x \leq 5 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\ -12 \cdot 10^{-3} \leq y \leq 12 \cdot 10^{-3} \text{ м} \end{cases} \\ 0 & \text{якщо } x, y \text{ інші} \end{cases}$$

А на рисунку 3 цей же розподіл зображений уздовж осей ОХ та ОУ (графік 1) і для порівняння розподіл ГВС створений одинарним витком з розмірами $16 \times 16 \text{ мм}$ (графік 2).

Розподіл ГВС одинарного витка має незначну область однорідності, так, уздовж осі ОХ вона становить близько 1 мм, а вздовж осі ОУ – 8 мм (рисунок 3, а, б). Покращити розподіл ГВС, а саме наблизити його до бажаного однорідного (рисунок 2), можна використанням системи котушок збудження різноманітних структур, як показано авторами на прикладі кругових ВСП [5-8] та рамкових НВСП [11].

Отже, постає задача проектування СЗ рамкового тангенціального НВСП, що забезпечує априорі заданий однорідний розподіл ГВС у контрольних точках зони ОК.

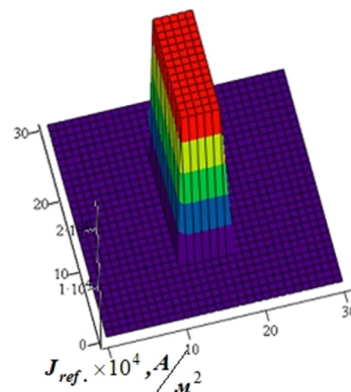
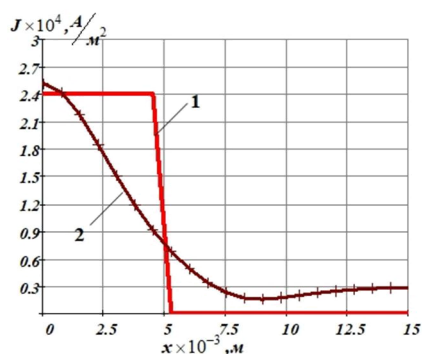
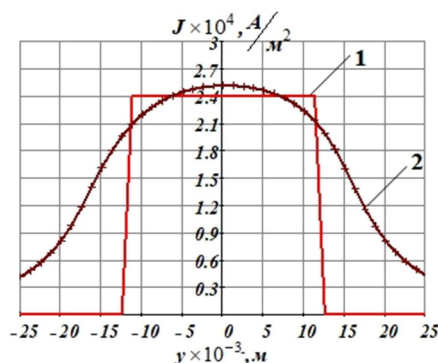


Рисунок 2 – Бажаний розподіл ГВС у зоні контролю



а)



б)

а) вздовж осі ОХ; б) вздовж осі ОУ: 1 – бажаний; 2 – створений одиночним витком прямокутної форми

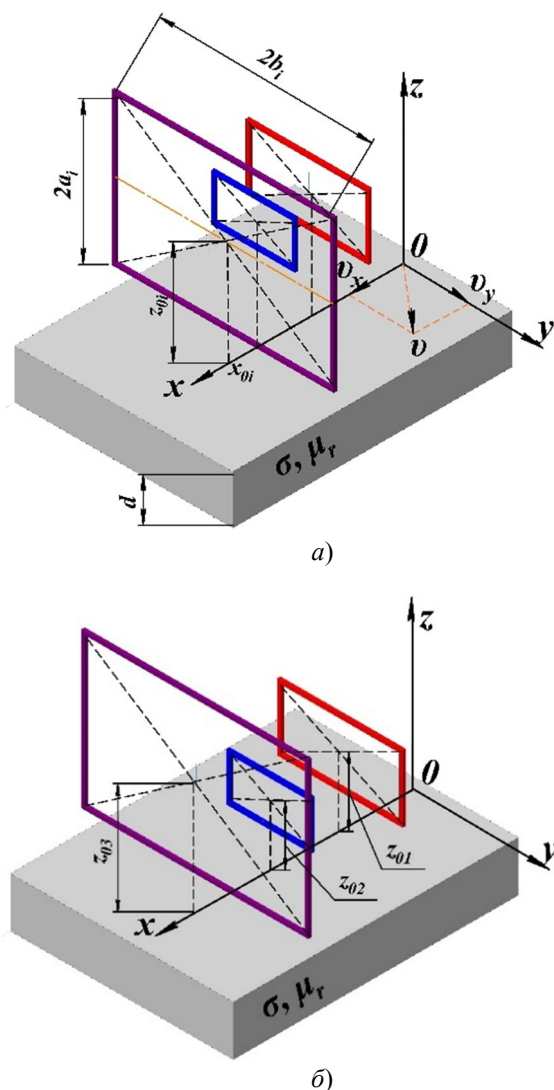
Рисунок 3 – Розподіл ГВС на поверхні ОК

Формулювання задачі синтезу. Розглядатимемо рухомий рамковий тангенціальний НВСП з об'ємною структурою СЗ, яка складається із сукупності M секційних котушок, кожна з яких містить w_i ($i = 1, \dots, M$) витків. Секційні котушки включені послідовно-зустрічно або послідовно-узгоджено та мають різні МРС Iw_i і живляться змінним струмом I круговою частотою ω . Така об'ємна структура СЗ характеризується наявністю секційних котушок з геометричними розмірами сторін $2a_i \times 2b_i$ кожної із них. Їх положення у просторі вздовж осі ОХ визначається величиною x_{0i} від початку системи координат (рисунок 4). Положення секційних котушок визначається також висотами z_{0i} їх розташування над ОК. На рисунку 4, а зображено структуру СЗ, для якої геометричні центри всіх котушок розміщені на однаковій висоті, тобто $z_{0i} = \text{const}$, а на рисунку 4, б – варіант СЗ, коли висота розташування котушок є різною $z_{0i} = \text{var}$. В цьому дослідженні надалі розглядається випадок, коли висота для всіх секцій є сталою і дорівнює z_0 . Для чисельних експе-

риментів використовуватимемо секції квадратної форми.

Задача синтезу сформульована в оптимізаційній постановці [15]. Цільова функція задана у вигляді квадратичного функціоналу, приклади застосування якого для задач синтезу НВСП розглянуто в роботах [14, 7].

Проте розв'язок оптимізаційної задачі із застосуванням «точної» математичної моделі (1), (2) ускладнений її великою обчислювальною ресурсомісткістю. Так, у роботі [16] показано ресурсомісткість розрахунку такої «точної» моделі, яка становить від 7 до 9 годин, що унеможливує безпосереднє її використання в задачах оптимального синтезу. Тому для реалізації задачі оптимального синтезу з метою зменшення ресурсомісткості обчислень застосовується технологія сурогатної оптимізації, основні етапи виконання якої описано в роботах [17-23]. Такий підхід успішно застосовувався для синтезу СЗ кругових НВСП з планарними [6-8] та об'ємними структурами [9, 10] й плоских СЗ прямокутної форми з генеруванням магнітного потоку збудження, нормального до ОК [1, 11].



а) $z_{0i} = \text{const}$; б) $z_{0i} = \text{var}$

Рисунок 4 – Різновиди об'ємних структур СЗ рамкових тангенціальних НВСП

Комп'ютерний план експерименту. Побудова метамоделі. Згідно з алгоритмом сурогатної оптимізації першим етапом є побудова метамоделі СЗ рухомого рамкового тангенціального НВСП. Розподіл ГВС для такої структури СЗ описується багатовимірною апроксимаційною залежністю $\hat{J} = f(x, y, a, x_0)$, де x й y є просторовими координатами на поверхні ОК в зоні контролю (рисунок 4, а).

Нині існує багато відомих підходів до побудови апроксимаційних залежностей. Зазвичай при їх застосуванні необхідно зважати як на переваги, так і на притаманні їм недоліки та враховувати особливості реалізації. Детальний аналіз цих методів розглянуто в оглядовій статті [24]. Широке застосування

в наукових задачах мають евристичні методи на основі штучних нейронних мереж (НМ) на радіально-базисних функціях RBF-ANN [14, 18, 19] та багатопланових перцептронах MLP-ANN [20, 21]. Тому в дослідженні для побудови багатовимірної апроксимаційної залежності, враховуючи переваги та недоліки нейромережових методів, обрано саме RBF-нейронні мережі з ядерною гаусовою функцією активації.

В роботах [5-7, 9-11] було показано, що на основі НМ-технік та із застосуванням гібридного підходу з різноманітними методами підвищення точності вдається отримати багатовимірні метамоделі НВСП із прийнятною похибкою апроксимації. Тому автором продовжено практику гібридного підходу до НМ і для створення метамоделі попередньо здійснено декомпозицію області пошуку на кілька підобластей, в яких застосовано адитивну НМ-регресію із використанням комітетів мереж на кожному рівні.

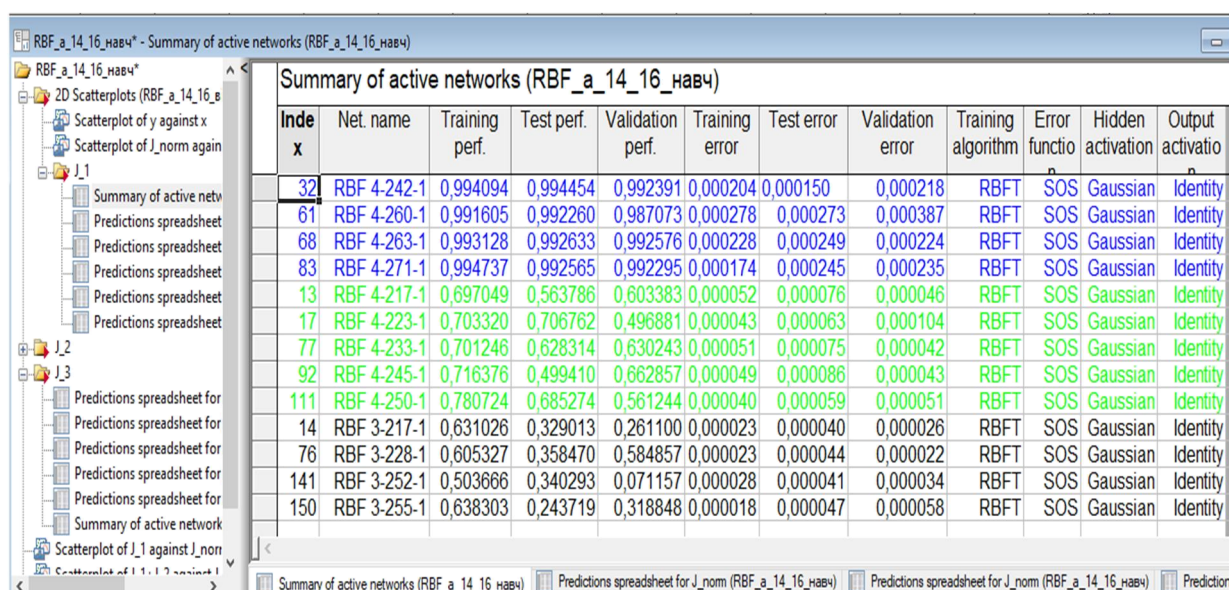
Для побудови метамоделі засобами штучних НМ створюється масив вихідних даних, який отримується розрахунком за «точними» математичними моделями в точках плану експерименту (ПЕ). Оскільки в цьому випадку топологія чотиривимірної поверхні відгуку є вельми складною і не підлягає візуалізації, тому доцільно використовувати комп'ютерні методи заповнення простору пошуку контрольними точками, тобто комп'ютерні плани експерименту (КПЕ). Так, в роботі [25] здійснено дослідження декількох квазिवипадкових послідовностей, які доцільно застосовувати для випадків багатовимірного факторного простору, а саме: комбінації ЛП_т-послідовностей Соболя для три-, чотири- та п'ятивимірних планів, які мають найкращі показники гомогенності та сукупності безпараметричних адитивних рекурсивних одновимірних R-послідовностей Кронекера.

Ефективний чотиривимірний комп'ютерний план експерименту для параметрів, що змінюються в межах: $x = 0 \dots 15$ мм, $y = -25 \dots 25$ мм, $a = 4 \dots 16$ мм, $x_0 = 0 \dots 4$ мм, реалізовано на основі сукупності безпараметричних адитивних рекурсивних одновимірних R-послідовностей за допомогою створеного програмного продукту [26]. Ефективність цього КПЕ підтверджується низькими показниками центрованого $CD_4 = 8,07 \cdot 10^{-5}$ та циклічного $WD_4 = 6,321$ розходжень для кількості точок $N_{\text{навч.}} = 2500$ [25, 26].

Область пошуку за розміром котушки a розділялася на шість декомпозиційних підобластей: $4 \leq a < 6$ мм, $6 \leq a < 8$ мм, $8 \leq a < 10$ мм, $10 \leq a < 12$ мм, $12 \leq a < 14$ мм, $14 \leq a \leq 16$ мм.

Для кожної підобласті в отриманих точках КПЕ розраховується розподіл ГВС за функціональними залежностями (1), (2) за наступних сталих параметрів: $d = 10$ мм, $z_0 = 19$ мм, $\vec{v} = (0,40,0)$ м/с, електрофізичні параметри матеріалу ОК $\sigma = 7.69 \cdot 10^6$ См/м, $\mu_r = 700$, частота $f = 4$ кГц; струм збудження $I = 1$ А.

Надалі застосуванням адитивної НМ-регресії отримано метамоделі для кожної підобласті із наступним об'єднанням отриманих рішень в єдине. Водночас використано кілька методів підвищення точності апроксимаційної моделі, що показали свою ефективність при побудові багатовимірних метамоделей [7, 9-11]. Так, на кожному проміжному рівні адитивної НМ-регресії застосовувався комбітет мереж із прийняттям рішення шляхом усереднення за ансамблем тих мереж, що мають найбільшу продуктивність (рисунк 5) [23].



Index	Net. name	Training perf.	Test perf.	Validation perf.	Training error	Test error	Validation error	Training algorithm	Error function	Hidden activation	Output activation
32	RBF 4-242-1	0,994094	0,994454	0,992391	0,000204	0,000150	0,000218	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
61	RBF 4-260-1	0,991605	0,992260	0,987073	0,000278	0,000273	0,000387	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
68	RBF 4-263-1	0,993128	0,992633	0,992576	0,000228	0,000249	0,000224	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
83	RBF 4-271-1	0,994737	0,992565	0,992295	0,000174	0,000245	0,000235	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
13	RBF 4-217-1	0,697049	0,563786	0,603383	0,000052	0,000076	0,000046	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
17	RBF 4-223-1	0,703320	0,706762	0,496881	0,000043	0,000063	0,000104	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
77	RBF 4-233-1	0,701246	0,628314	0,630243	0,000051	0,000075	0,000042	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
92	RBF 4-245-1	0,716376	0,499410	0,662857	0,000049	0,000086	0,000043	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
111	RBF 4-250-1	0,780724	0,685274	0,561244	0,000040	0,000059	0,000051	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
14	RBF 3-217-1	0,631026	0,329013	0,261100	0,000023	0,000040	0,000026	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
76	RBF 3-228-1	0,605327	0,358470	0,584857	0,000023	0,000044	0,000022	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
141	RBF 3-252-1	0,503666	0,340293	0,071157	0,000028	0,000041	0,000034	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
150	RBF 3-255-1	0,638303	0,243719	0,318848	0,000018	0,000047	0,000058	RBFT	SOS	Gaussian	Identity

Рисунок 5 – Показники продуктивності та абсолютної похибки адитивної НМ-регресії для підобласті $14 \leq a \leq 16$ мм

Для утворення комітету НМ відбиралися найкращі мережі за показниками продуктивності, коефіцієнта детермінації R^2 , середньої відносної величини модельної похибки $MAPE$, % і суб'єктивним аналізом діаграм розсіювання та гістограм залишків [18, 27, 28]. Для формування навчальних, тестувальних та контрольних підвибірок застосовується бегінг-процедура. Завдяки такій гібридній побудові адитивної НМ-регресії вдалося отримати значення $MAPE$ для складної топології розподілу ГВС на рівні від 2.14 % до 4 % на етапі її навчання. В таблиці 1 наведено відомості щодо побу-

дови метамоделі для однієї підобласті $14 \leq a \leq 16$ мм. В цій таблиці показано три проміжні рівні адитивної НМ-регресії $J_1 - J_3$, для кожного із яких представлено складові НМ, що відібрані для утворення комітету, а також отримано чисельні значення $MAPE$. Окрім похибки $MAPE$, створені метамоделі оцінювалися за низкою інших статистичних показників – як якісних, так і кількісних [18, 29]. На рисунку 5 наведено НМ, що відібралися для утворення комітету, і чисельні значення продуктивності, абсолютної похибки кожної із них.

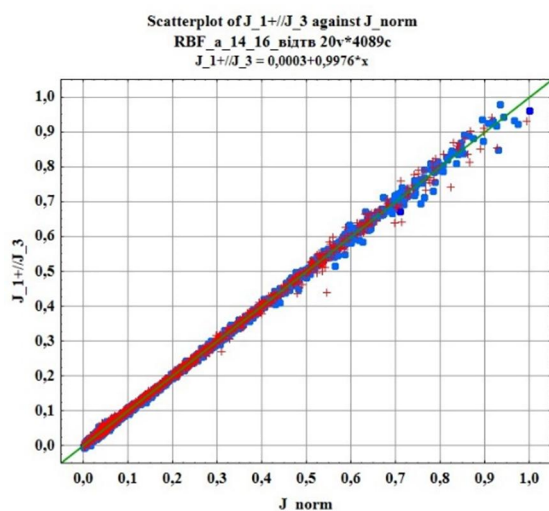
Таблиця 1 – Відомості щодо створення метамоделі квадратного рухомого тангенціального НВСП з об'ємною структурою СЗ для зрізу $14 \leq a \leq 16$ мм на етапах навчання ($N_{навч} = 2050$) та відтворення ($N_{відтв} = 4090$) поверхні відгуку

Рівень НМ-регресії	Нейронні мережі, що є складовими комітетів	MAPE, %	
		Навчання	Відтворення
$\hat{J}_1$	RBF-4-242-1(32)	7,7	7,88
	RBF-4-234-1(16)		
	RBF-4-263-1(68)		
	RBF-4-271-1(83)		
$\hat{J}_2$	RBF-4-223-1(17)	4,98	5,39
	RBF-4-217-1(13)		
	RBF-4-233-1(77)		
	RBF-4-250-1(111)		
	RBF-4-245-1(92)		
$\hat{J}_3$	RBF-4-217-1(14)	4	4,47
	RBF-4-228-1(76)		
	RBF-4-252-1(141)		
	RBF-4-255-1(150)		

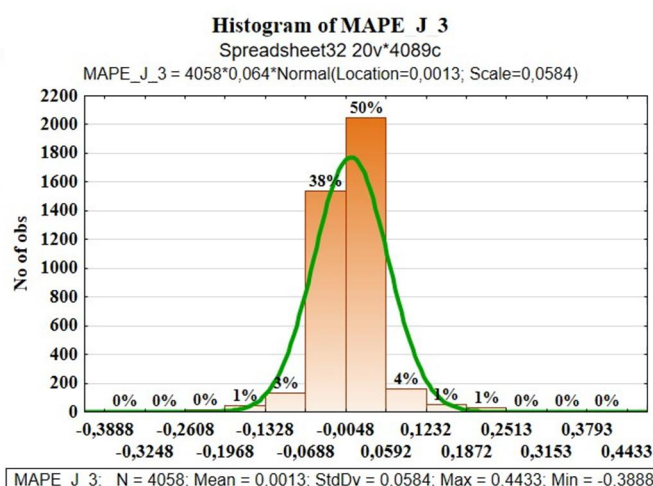
Верифікація створеної метамоделі.

Верифікація метамоделі виконувалася перевіркою правильності відтворення поверхні відгуку в усіх підобластях на вибірці, що має більшу кількість точок $N_{відтв} = 4090$, ніж при навчанні, тобто $N_{відтв} > N_{навч}$. На етапі відтворення поверхні відгуку оцінювалися адекватність отриманої метамоделі за критерієм Фішера та інформативність за коефіцієнтом детермінації [18, 29]. Для ілюстрації адекватності створеної метамоделі на рисунку 6, а

зображено діаграми розсіювання значень чотиривимірної апроксимаційної моделі, а на рисунку 6, б – гістограму розподілу отриманої похибки $MAPE$ у відносних одиницях для однієї з підобластей. На рисунку 7 наведено результат відтворення поверхні відгуку у вигляді ліній рівня для одного узагальненого зрізу поверхні. Для інших підобластей похибка $MAPE$ на етапі відтворення становила від 2,15 % до 2,87 %.



а)



б)

а) діаграма розсіювання; б) гістограма розподілу похибки $MAPE$

Рисунок 6 – Відтворення поверхні відгуку для підобласті $14 \leq a \leq 16$ мм

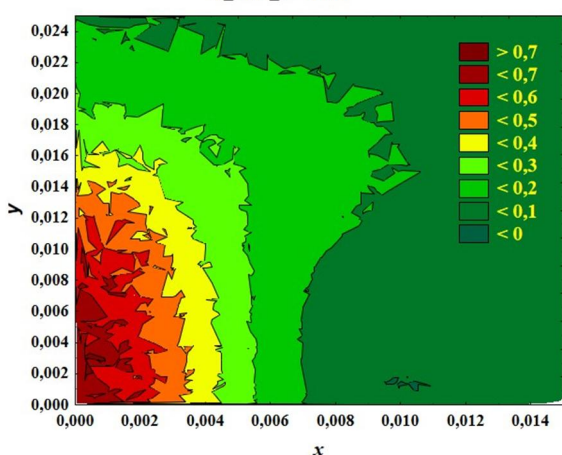
3D Wafer Plot of $J_1 + J_3$ against x and y ; categorized by Subset $J_1 + J_3 = \text{Wafer}$ 

Рисунок 7 – Відтворення чотирирівимірної поверхні відгуку у вигляді ліній рівня для узагальненого зрізу поверхні $14 \leq a \leq 15$ мм

Оптимальний сурогатний синтез СЗ.

Надалі розв'язувалася задача лінійного сурогатного оптимального синтезу, де в формулі цільової функції замість «точної» математичної моделі використовувалася отримана RBF-метамодель тангенціального НВСП. Разом з тим, задавався бажаний розподіл ГВС у зоні контролю (рисунки 2, 3), який необхідно отримати в результаті розв'язку задачі.

Для розв'язку нелінійних обернених задач доцільно застосувати стохастичні алгоритми пошуку глобального екстремуму [30, 31]. В цьому дослідженні розв'язок отримано з використанням декількох алгоритмів, один із яких – гібридний алгоритм на основі генетичного з локальним пошуком симплексним методом Нелдера-Міда, другий – алгоритм рою частинок PSO-RND із випадковою стратегією топології зв'язків, наступний – популяційний метаевристичний алгоритм оптимі-

зації роєм частинок з еволюційним формуванням складу рою, що являє собою низькорівневу гібридизацію генетичного алгоритму й алгоритму PSO [30, 31].

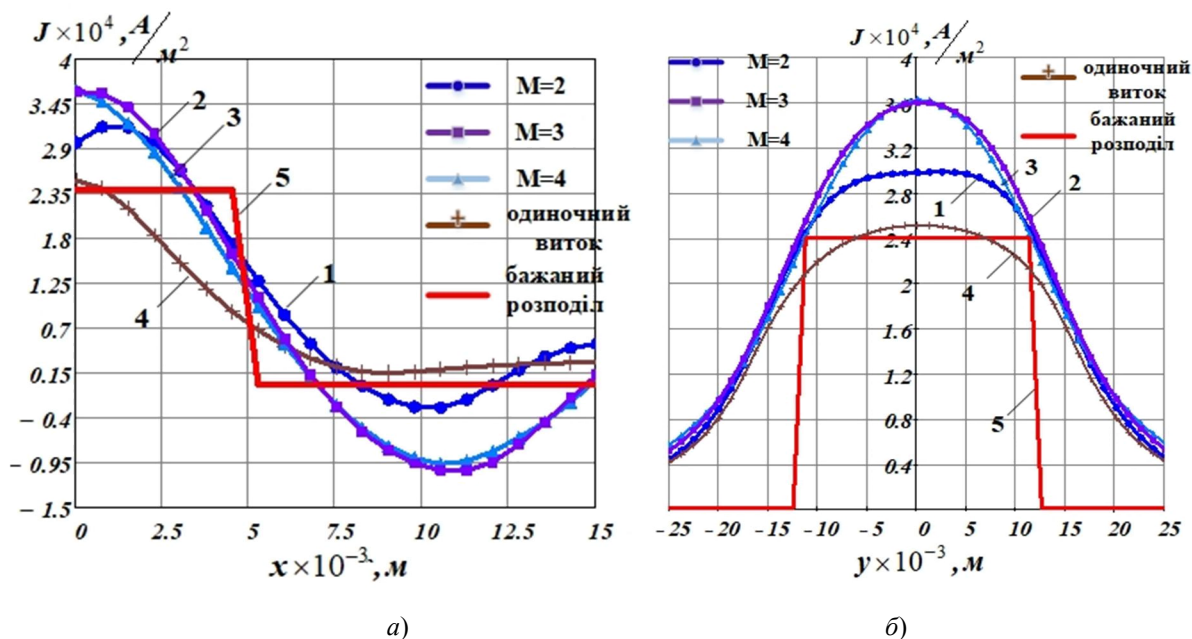
Для того щоб отримати наперед заданий розподіл ГВС у рамках лінійного синтезу, наприклад П-подібний (рисунок 2), необхідно визначити МРС Iw_i для кожної із секційних котушок СЗ за умови відомих координат їх розміщення у просторі та їх заданої кількості M .

Результати досліджень і їх обговорення. Для чисельного моделювання задавалися варіанти об'ємних структур СЗ з різною кількістю квадратних котушок $M = 2 - 4$, відстань між якими є однаковою (рисунок 4, а). Попередній аналіз результатів синтезу дає змогу відібрати декілька структур СЗ, що мають найкращі наближення до однорідного розподілу ГВС. Чисельні результати розв'язку задачі синтезу подано в таблиці 2. Отримані в сукупності параметри забезпечують наближення створеного розподілу ГВС до апіорі заданого П-подібного на поверхні ОК в зоні контролю. В таблиці 2 знак «-» для МРС означає зустрічне включення секційної котушки.

Надалі виконувався розрахунок розподілів ГВС для структури СЗ з отриманими в результаті синтезу параметрами за «точною» електродинамічною моделлю. Результат розрахунку проілюстровано графічно у вигляді зміни розподілу ГВС вздовж осей ОХ та ОУ на рисунку 8, графіки 1–3. Додатково для візуального порівняння там же наведено апіорі заданий розподіл ГВС (графік 5) та розподіл, створений одинарним квадратним витком з розмірами 16×16 мм (графік 4).

Таблиця 2 – Результати сурогатного лінійного синтезу СЗ рамкових рухомих тангенціальних НВСП з різноманітними варіантами об'ємних структур

№ секції	Синтезовані системи збудження								
	M=2			M=3			M=4		
	a , мм	x_0 , мм	Iw , А×витки	a , мм	x_0 , мм	Iw , А×витки	a , мм	x_0 , мм	Iw , А×витки
1	4	0	-39.27	4	0	-92.13	4	3	-75.56
2	14	1	3.9	9	0.5	11.57	8	2	6.94
3				14	1	3.3	12	1	6.46
4							16	0	0.19



а) розподіл ГВС уздовж осі ОХ; б) розподіл ГВС уздовж осі ОУ

Рисунок 8 – Результати синтезу рухомих тангенціальних НВСП з квадратною об'ємною структурою СЗ, обчислені за «точною» електродинамічною моделлю

Отже, всі синтезовані структури СЗ, подані в таблиці 2, реалізують близький до однорідного розподіл ГВС, який перевищує заданий рівень інтенсивності J_{ref} на заданій ділянці $0 < x < 5$ мм та $-12 < y < 12$ мм, що ілюструється рисунком 8. До того ж, порівняння розподілів ГВС, які створюються синтезованими об'ємними структурами СЗ та одинарним витком квадратної форми (рисунок 8, графік 4), безперечно, вказує на те, що всі синтезовані варіанти мають кращі результати. Про це переконливо свідчать графічні залежності 1–3 на рисунку 8.

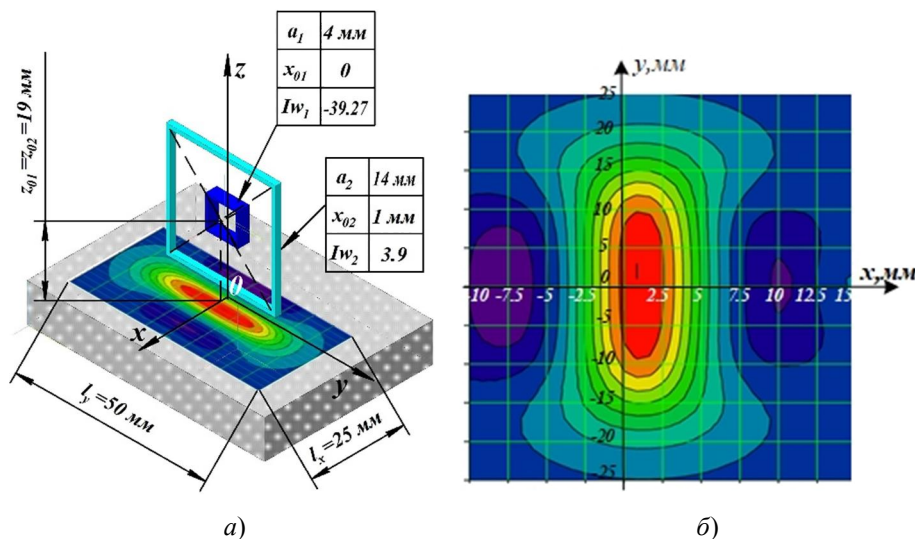
За сумарною кількістю ампер-витків, що необхідні для створення СЗ, структури з $M=3$ та $M=4$ є майже рівнозначними. Однак варіант СЗ з $M=4$ складніший у технологічному сенсі, оскільки він має більшу кількість секцій. За умови майже однакових результатів, щодо забезпечення однорідного розподілу ГВС перевагу варто віддати найпростіший у технічній реалізації структури

СЗ із $M=2$ секційних котушок. На рисунку 9, а зображено загальний вигляд такої об'ємної структури СЗ, а на рисунку 9, б показано у вигляді ліній рівня розподіл ГВС, створений нею.

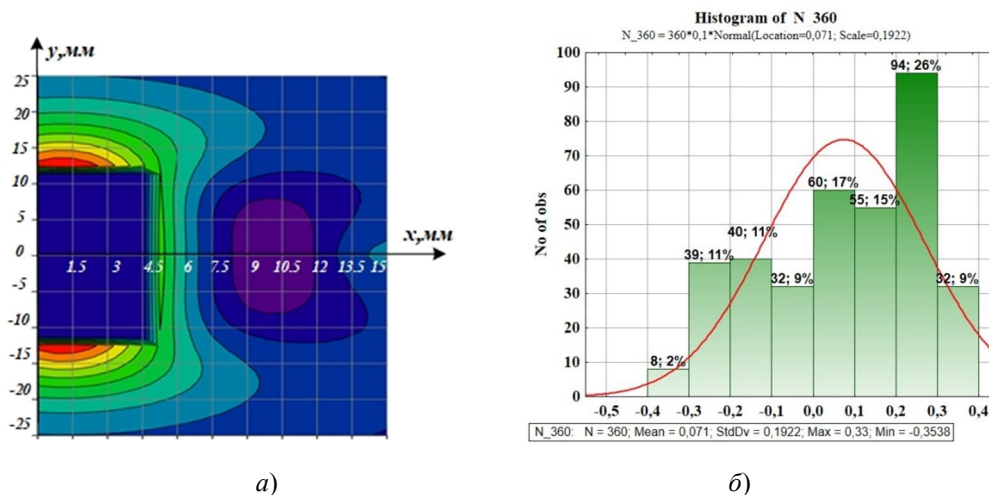
Далі з'ясуємо, наскільки відрізняється розподіл ГВС, створений синтезованою СЗ, від бажаного розподілу ГВС, тобто визначалася відносна похибка синтезу:

$$\delta_i = \frac{J_{i.cumm.} - J_{i.ref.}}{J_{i.ref.}} \cdot 100\%, \text{ де } i = 1 \dots 800.$$

Отримані результати у вигляді ліній рівня розподілу відносної похибки синтезу для структури СЗ із $M=2$ секційних витків зображено на рисунку 10, а, а на рисунку 10, б – гістограми розподілу цієї похибки. Середнє значення похибки синтезу в зоні контролю ОК ($0 < x < 5$ мм та $-12 < y < 12$ мм) для цієї структури СЗ становить 18.04 %, що є прийнятним результатом.



а) загальний вигляд; б) розподіл ГВС, представлений у вигляді ліній рівня

Рисунок 9 – Синтезована об'ємна структура СЗ рамкового тангенціального НВСП із $M = 2$ 

а) лінії рівня розподілу; б) гістограма розподілу

Рисунок 10 – Відносна похибка синтезу

Висновки. Отже, в дослідженні запропоновано методи й алгоритми лінійного сурогатного оптимального параметричного синтезу рамкових рухомих тангенціальних НВСП з об'ємною структурою СЗ, які дають можливість розширити зону з рівномірним розподілом ГВС. У дослідженні чисельними експериментами показано ефективність розв'язку задачі лінійного синтезу рухомого рамкового тангенціального НВСП з об'ємною структурою СЗ. Для її реалізації поетапно виконано декілька взаємопов'язаних задач.

КПЕ чотиривимірного факторного простору реалізовано на основі сукупності безпараметричних адитивних рекурсивних одновимірних R-послідовностей Кронекера.

Завдяки використанню КПЕ з низькими показниками розбіжності відтворення глобальної та локальної поведінки чотиривимірної поверхні відгуку забезпечується найкраще. Для побудови багатовимірної апроксимаційної моделі з урахуванням суттєвої нелінійності та нерегулярної поведінки гіперповерхонь відгуку використано гібридний підхід. Цей підхід 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 два методи – це усереднення за ансамблем НМ та підсилення шляхом формування підвибірок (бегтінг). Все це та додатко-

ве ускладнення структури адитивної НМ-регресії (застосування комітетів НМ на кожному проміжному рівні апроксимації) дало змогу досягти прийнятної похибки *MAPE* чотиривимірної метамоделі рухомого рамкового тангенціального НВСП як на етапі її навчання, так і на етапі відтворення.

Отримані в цьому дослідженні результати надалі можуть бути використані як початкові при здійсненні процедури нелінійного синтезу. Це дасть можливість уточнити геометричні розміри компонентів структури збудження, що позитивно відіб'ється на похибці однорідного розподілу густини вихрових струмів у зоні контролю.

Список використаних джерел

- [1] A. S. Repelianto, "Development of uniform eddy current probes using multi-excitation coils", Doctoral Dissertation, Graduate School of Media and Information Sciences Yokohama National University, 2020.
- [2] Z. Su, C. Ye, A. Tamburrino, L. Udpa, and S. Udpa, "Optimization of coil design for eddy current testing of multi-layer structures", *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 52, no. 1-2, pp. 315-322, 2016.
- [3] Z. Liu, J. Yao, C. He, Z. Li, X. Liu, and B. Wu, "Development of a bidirectional-excitation eddy-current sensor with magnetic shielding: Detection of subsurface defects in stainless steel", *IEEE Sensors J.*, vol. 18, no. 15, pp. 6203-6216, 2018.
- [4] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetskaya, and V. V. Tychkov, "Surface eddy current probes: excitation systems of the optimal electromagnetic field (review)", *Devices and Methods of Measurements*, vol. 11, no. 2, pp. 91-104, 2020.
- [5] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetskaya, and V. V. Tychkov, "Linear synthesis of non-axial surface eddy current probes", *International Journal "NDT Days"*, vol. 2, no. 3, pp. 259-268, 2019.
- [6] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, "Linear synthesis of uniform anaxial eddy current probes with a volumetric structure of the excitation system", *International Journal "NDT Days"*, vol. 3, no. 4, pp. 184-190, 2020.
- [7] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, "Non-linear surrogate synthesis of the surface circular eddy current probes", *Przegląd elektrotechniczny*, no. 9, pp. 76-82, 2019.
- [8] Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко, та В. В. Тичков, "Оптимальний сурогатний параметричний синтез накладних кругових неспіввісних вихрострумових перетворювачів із рівномірною чутливістю в зоні контролю", *Вісник Херсонського національного технічного університету*, т. 69, № 2, ч. 2, с. 118-125, 2019.
- [9] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, and V. V. Tychkov, "Multiparameter hybrid neural network metamodel of eddy current probes with volumetric structure of excitation system", *International Scientific Journal "Mathematical Modeling"*, vol. 3, no. 4, pp. 113-116, 2019.
- [10] Р. В. Трембовецкая, В. Я. Гальченко, В. В. Тычков, и А. В. Сторчак, "Линейный синтез анаксиальных однородных вихретоковых преобразователей с объемной структурой системы возбуждения", *International Journal "NDT Days"*, т. 3, № 4, с. 184-190, 2020.
- [11] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, V. V. Tychkov, and C. V. Bazilo, "Linear synthesis of frame eddy current probes with a planar excitation system", *International Scientific Journal "Mathematical Modeling"*, vol. 4, no. 3, pp. 86-90, 2020.
- [12] L. Huang, J. Zou, J. Zhang, Y. Zhou, and F. Deng, "A novel rectangular vertical probe with a conductive shell for eddy current testing", *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 62, no. 1, pp. 191-205, 2019.
- [13] T. Itaya, K. Ishida, Y. Kubota, A. Tanaka, and N. Takehira, "Visualization of eddy current distributions for arbitrarily shaped coils parallel to a moving conductor slab", *Progress in Electromagnetics Research M*, vol. 47, pp. 1-12, 2016.
- [14] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, and V. V. Tychkov, "Development of excitation structure RBF-metamodels of moving concentric eddy current probe", *Electrical engineering & electromechanics*, no. 2, pp. 28-38, 2019.
- [15] В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, та В. В. Тичков, "Оптимальне проектування вихрострумових перетворювачів та аналіз методів розв'язку нелінійних оберне-

- них задач", *Прикладні питання математичного моделювання*, т. 3, № 2.2, с. 93-104, 2020.
- [16] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, and V. V. Tychkov, "Studying the computational resource demands of mathematical models for moving surface eddy current probes for synthesis problems", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 95, no. 5/5, pp. 39-46, 2018.
- [17] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, and V. V. Tychkov, "The RBF-metamodel development of surface eddy-current probe for the surrogate optimal synthesis problem", *International Journal "NDT Days"*, vol. 1, no. 4, pp. 425-433, 2018.
- [18] В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, та В. В. Тичков, "Застосування нейрокомп'ютинга на етапі побудови метамodelей в процесі оптимального сурогатного синтезу антен", *Вісник НТУУ "КПІ". Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування*, № 74, с. 60-72, 2018.
- [19] В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, та В. В. Тичков, "Нейромережева метамodelь циліндричного накладного вихрострумowego перетворювача як складова сурогатного оптимального синтезу", *Вісник Херсонського національного технічного університету*, т. 66, № 3, ч. 1, с. 32-38, 2018.
- [20] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, and V. V. Tychkov, "The MLP-metamodels application in the surrogate optimization tasks", *Young Scientist*, vol. 6, no. 2, pp. 32-39, 2018.
- [21] Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко, та В. В. Тичков, "Побудова MLP-метамodelі накладного вихрострумowego перетворювача для задач сурогатного оптимального синтезу", *Технічні вісті*, т. 47, № 1, т. 48, № 2, с. 27-31, 2018.
- [22] В. Я. Гальченко, В. В. Тичков, А. В. Сторчак, та Р. В. Трембовецька, "Відновлення приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об'єктів при вихрострумowych вимірюваннях із наявністю апіорних даних. Формування вибірки для побудови сурогатної моделі", *Український метрологічний журнал*, № 1, с. 35-50, 2020.
- [23] В. Я. Гальченко, А. В. Сторчак, В. В. Тичков, та Р. В. Трембовецька, "Створення сурогатної моделі для відновлення приповерхневих профілів електрофізичних характеристик циліндричних об'єктів", *Український метрологічний журнал*, № 3, с. 27-35, 2020.
- [24] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, "Methods for creating metamodels: state of the question", *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, vol. 151, no. 4, pp. 74-88, 2020.
- [25] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, "The construction of effective multidimensional computer designs of experiments based on a quasi-random additive recursive Rd-sequence", *Applied Computer Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 70-76, 2020.
- [26] В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, та В. В. Тичков, "Програма створення багатовимірного комп'ютерного однорідного плану експерименту на основі R-послідовностей", *Свідомство 102018 України про реєстрацію авторського права на твір*, № 103492; заявл. 24.12.20; зареєстр. 25.01.21 в Держ. реєстрі свідомств про реєстрацію авторського права на твір.
- [27] Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко, В. В. Тичков, та А. В. Сторчак, "Оцінка точності нейромережевих метамodelей кругових накладних вихрострумowych перетворювачів", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 18-29, 2019.
- [28] M. Elsayah, *Constructing uniform experimental designs: in view of centered and wrap-around discrepancy*, LAP LAMBERT Academic Publishing: (Theory of probability, stochastics, mathematical statistics), 2014.
- [29] H. Brink, J. Richards, and M. Feverolph, *Machine learning*, St. Petersburg, Russia: Peter, 2017.
- [30] V. Ya. Halchenko, A. N. Yakimov, and D. L. Ostapuschenko, "Global optimum search of functions with using of multiagent swarm optimization hybrid with evolutionary composition formation of population", *Information technology*, no. 10, pp. 9-16, 2010.
- [31] V. Ya. Halchenko, A. N. Yakimov, and D. L. Ostapuschenko, "Method of Pareto-optimal parametric synthesis of axially symmetric magnetic systems taking into account the nonlinear magnetic properties of a ferromagnetic", *Journal of Technical Physics*, no. 7, pp. 1-7, 2012.

References

- [1] S. Repelianto, "Development of uniform eddy current probes using multi-excitation coils", Doctoral Dissertation, Graduate School of Media and Information Sciences Yokohama National University, 2020.
- [2] Z. Su, C. Ye, A. Tamburrino, L. Udpa, and S. Udpa, "Optimization of coil design for eddy current testing of multi-layer structures", *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 52, no. 1-2, pp. 315-322, 2016.
- [3] Z. Liu, J. Yao, C. He, Z. Li, X. Liu, and B. Wu, "Development of a bidirectional-excitation eddy-current sensor with magnetic shielding: Detection of subsurface defects in stainless steel", *IEEE Sensors J.*, vol. 18, no. 15, pp. 6203-6216, 2018.
- [4] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetskaya, and V. V. Tychkov, "Surface eddy current probes: excitation systems of the optimal electromagnetic field (review)", *Devices and Methods of Measurements*, vol. 11, no. 2, pp. 91-104, 2020.
- [5] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetskaya, and V. V. Tychkov, "Linear synthesis of non-axial surface eddy current probes", *International Journal "NDT Days"*, vol. 2, no. 3, pp. 259-268, 2019.
- [6] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, "Linear synthesis of uniform anaxial eddy current probes with a volumetric structure of the excitation system", *International Journal "NDT Days"*, vol. 3, no. 4, pp. 184-190, 2020.
- [7] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, "Non-linear surrogate synthesis of the surface circular eddy current probes", *Przegląd elektrotechniczny*, no. 9, pp. 76-82, 2019.
- [8] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, and V. V. Tychkov, "Optimal surrogate parametric synthesis of surface circular nonaxial eddy-current probes with uniform sensitivity in the testing zone", *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, vol. 69, no. 2 (2), pp. 118-125, 2019 [in Ukrainian].
- [9] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, and V. V. Tychkov, "Multiparameter hybrid neural network metamodel of eddy current probes with volumetric structure of excitation system", *International Scientific Journal "Mathematical Modeling"*, vol. 3, no. 4, pp. 113-116, 2019.
- [10] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, "Linear synthesis of uniform anaxial eddy current probes with a volumetric structure of the excitation system", *International Journal "NDT Days"*, vol. 3, no. 4, pp. 184-190, 2020 [in Russian].
- [11] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, V. V. Tychkov, and C. V. Bazilo, "Linear synthesis of frame eddy current probes with a planar excitation system", *International Scientific Journal "Mathematical Modeling"*, vol. 4, no. 3, pp. 86-90, 2020.
- [12] L. Huang, J. Zou, J. Zhang, Y. Zhou, and F. Deng, "A novel rectangular vertical probe with a conductive shell for eddy current testing", *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 62, no. 1, pp. 191-205, 2019.
- [13] T. Itaya, K. Ishida, Y. Kubota, A. Tanaka, and N. Takehira, "Visualization of eddy current distributions for arbitrarily shaped coils parallel to a moving conductor slab", *Progress in Electromagnetics Research M*, vol. 47, pp. 1-12, 2016.
- [14] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, and V. V. Tychkov, "Development of excitation structure RBF-metamodels of moving concentric eddy current probe", *Electrical engineering & electromechanics*, no. 2, pp. 28-38, 2019.
- [15] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, and V. V. Tychkov, "Optimal design of eddy current probes and analysis of methods for solutions of nonlinear inverse problems", *Prykladni pytannia matematychnoho modeluvannia*, vol. 3, no. 2.2, pp. 93-104, 2020 [in Ukrainian].
- [16] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, and V. V. Tychkov, "Studying the computational resource demands of mathematical models for moving surface eddy current probes for synthesis problems", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 95, no. 5/5, pp. 39-46, 2018.
- [17] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, and V. V. Tychkov, "The RBF-metamodel

- development of surface eddy-current probe for the surrogate optimal synthesis problem", *International Journal "NDT Days"*, vol. 1, no. 4, pp. 425-433, 2018.
- [18] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, and V. V. Tychkov, "The use of neurocomputing at the stage of metamodels development in the process of optimal surrogate antennas synthesis", *Visnyk NTUU «KPI». Seriya Radiotekhnika. Radioaparaturbuduvannia*, no. 74, pp. 60-72, 2018 [in Ukrainian].
- [19] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, and V. V. Tychkov, "Neuro-network metamodel of cylindrical eddy-current probe as a surrogate optimum synthesis component", *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, vol. 66, no. 3 (1), pp. 32-38, 2018.
- [20] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, and V. V. Tychkov, "The MLP-metamodels application in the surrogate optimization tasks", *Young Scientist*, vol. 6, no. 2, pp. 32-39, 2018.
- [21] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, and V. V. Tychkov, "Design of an MLP-metamodel of a surface eddy-current probe for problems of surrogate optimal synthesis", *Tekhnichni visti*, vol. 47, no. 1, vol. 48, no. 2, pp. 27-31, 2018 [in Ukrainian].
- [22] V. Ya. 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*, no. 1, pp. 35-50, 2020 [in Ukrainian].
- [23] V. Ya. Halchenko, A. V. Storchak, V. V. Tychkov, and R. V. Trembovetska, "The creation of a surrogate model for restoring surface profiles of electrophysical characteristics of cylindrical objects", *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*, no. 3, pp. 27-35, 2020 [in Ukrainian].
- [24] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, "Methods for creating metamodels: state of the question", *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, vol. 151, no. 4, pp. 74-88, 2020.
- [25] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, "The construction of effective multidimensional computer designs of experiments based on a quasi-random additive recursive Rd-sequence", *Applied Computer Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 70-76, 2020.
- [26] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, and V. V. Tychkov, "Program for creating a multidimensional computer homogeneous experimental plan based on R-sequences"; *Certificate 102018 Ukraine on the registration of copyright for an official work № 103492*; declared 24.12.20; registered on 25.01.21 in the State Register of copyright registration certificates for the work [in Ukrainian].
- [27] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, "Estimation of accuracy of neuro-network metamodels of surface eddy current probes", *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu*, no. 2, pp. 18-29, 2019 [in Ukrainian].
- [28] M. El Sawah, *Constructing uniform experimental designs: in view of centered and wrap-around discrepancy*, LAP LAMBERT Academic Publishing: (Theory of probability, stochastics, mathematical statistics), 2014.
- [29] H. Brink, J. Richards, and M. Feverolph, *Machine learning*, St. Petersburg, Russia: Peter, 2017.
- [30] V. Ya. Halchenko, A. N. Yakimov, and D. L. Ostapushenko, "Global optimum search of functions with using of multiagent swarm optimization hybrid with evolutionary composition formation of population", *Information technology*, no. 10, pp. 9-16, 2010.
- [31] V. Ya. Halchenko, A. N. Yakimov, and D. L. Ostapushenko, "Method of Pareto-optimal parametric synthesis of axially symmetric magnetic systems taking into account the nonlinear magnetic properties of a ferromagnetic", *Journal of Technical Physics*, no. 7, pp. 1-7, 2012.

R. V. Trembovetska, *Cand. of Tech. Sciences, associate professor*,
e-mail: r.trembovetska@chdtu.edu.ua

V. Ya. Halchenko, *Doctor of Tech. Sciences, professor*,
V. V. Tychkov, *Cand. of Tech. Sciences, associate professor*
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

LINEAR SURROGATE SYNTHESIS OF FRAME TANGENTIAL EDDY CURRENT PROBES WITH A VOLUMETRIC STRUCTURE OF THE EXCITATION SYSTEM

A mathematical method of linear surrogate parametric synthesis of frame tangential eddy current probes with a three-dimensional structure of the excitation system is proposed, which provides a uniform eddy current density distribution in the testing object zone. To achieve optimal synthesis, several interrelated tasks are performed in stages.

Thus, the design of experiment (DOE) for four-dimensional factor space is proposed to be realized on the basis of a set of nonparametric additive recursive one-dimensional Kronecker's R-sequences. The use of DOEs with low discrepancies best reproduces the global and local behavior of the four-dimensional response surface. Given the significant nonlinearity and irregular behavior of the response hypersurface, a hybrid approach has been used to design a multidimensional approximation model. This approach involves the simultaneous use of decomposition technologies of the search area and neural network (NN), which are based on the techniques of associative machines, as well as additive NN-regression. To increase the accuracy of additive NN-regression, several methods, namely averaging over the NN ensemble and amplification by forming subsamples (begging), have been used. All this and the additional complication of the structure of additive NN-regression, namely the use of NN committees at each intermediate level of approximation, have allowed to achieve an acceptable MAPE error of a four-dimensional metamodel of a moving frame tangential SECP with a three-dimensional excitation system, both at the stage of training and at the stage of reproduction. The paper presents numerical results and graphical material that illustrates the adequacy and informativeness of the obtained metamodel.

An example of synthesis of such excitation systems using modern metaheuristic stochastic algorithms for finding the global extremum is considered. Numerical results of the obtained solution and graphical illustrative material of the eddy current density distribution on the surface in the testing object zone are given. The proposed methods and algorithms of linear surrogate optimal parametric synthesis allow to obtain acceptable accuracy of synthesis in the testing area of the frame tangential SECP with the three-dimensional structure of the excitation system.

Keywords: *frame tangential eddy current probe, volumetric structure of excitation system, eddy current density, uniform sensitivity, additive neural network regression.*