

СИНТЕЗ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ОБ'ЄМНОЮ СТРУКТУРОЮ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ, ЩО РЕАЛІЗУЄ ОДНОРІДНУ ЧУТЛИВІСТЬ В ЗОНІ КОНТРОЛЮ

В.Я. Гальченко^{*}, докт.техн.наук, Р.В. Трембовецька^{**}, канд.техн.наук,

В.В. Тичков^{***}, канд.техн.наук

Черкаський державний технологічний університет,

бул. Шевченка, 460, Черкаси, 18006, Україна.

E-mail: v.tychkov@chdtu.edu.ua

Запропоновано метод нелінійного сурогатного синтезу накладних вихрострумів перетворювачів з об'ємною структурою системи збудження, що забезпечує апіорі заданий однорідний розподіл густини вихрових струмів в зоні контролю об'єкта, де розташовано вимірювальну котушку. Реалізація поставленої задачі досягнута із застосуванням сучасних метаевристичних стохастичних алгоритмів пошуку глобального екстремуму. Задля ефективного використання таких алгоритмів попередньо створено метамодель вихрострумів перетворювача із врахуванням ефекту швидкості, які побудовано за допомогою продуктивної апроксимаційної техніки на основі штучних радіально-базисних нейронних мереж із гаусовою функцією активації. Досягнуто прийнятну точність метамодель шляхом одночасного застосування технології декомпозиції області пошуку та множинних нейронних мереж, що побудовані на техніках асоціативних машин із груповими методами отримання рішення. Під час створення метамодель використано багатовимірний комп'ютерний план експерименту з високою гомогенністю на основі безпараметричної адитивної R_d -послідовності Кронекера. Проведено чисельні експерименти щодо визначення розподілу густини вихрових струмів, утвореного синтезованими структурами збудження. Показано переваги використання системи збудження об'ємної структури у порівнянні із класичними та планарними в сенсі збільшення ширини зони контролю, яка характеризується однорідною чутливістю. Наведено приклади практичної реалізації системи збудження накладного вихрострумів перетворювача з об'ємною її структурою. Бібл. 13, рис. 8, табл. 1.

Ключові слова: вихрострумівий перетворювач, густина вихрового струму, ефект швидкості, система збудження, однорідна чутливість, сурогатна оптимізація, RBF-метамодель, безпараметрична адитивна R_d -послідовність, стохастичний алгоритм пошуку глобального екстремуму.

Вступ. Дефектоскопічний контроль в промисловості значної частки металевих матеріалів та виробів, в тому числі з автоматичним скануванням, здійснюється з використанням накладних вихрострумів перетворювачів (НВСП) класичних конструкцій. Сучасні вимоги до неруйнівних засобів контролю вимагають не тільки виявлення різноманітних дефектів, зокрема дефектів порушень суцільності та структури матеріалів й виробів, але також встановлення їхньої форми, допустимих розмірів, прийнятності структурних відхилень, що є значно складнішою проблемою. Перехід до дефектометрії, що є викликом сьогодення, передбачає значно більш жорсткі вимоги до характеристик ВСП.

Слід враховувати, що розв'язок так званих задач дефектометрії, тобто ідентифікації дефектів, має значні економічні наслідки. Ефективне виконання ідентифікації дефектів значно скорочує перебраковку як матеріалів на підготовчому етапі виробництва, так і вже готових виробів під час визначення їхньої придатності до експлуатації або в її процесі, що суттєво впливає на кінцеві матеріальні затрати виробництва.

Ідеальному НВСП властивий однорідний розподіл густини вихрових струмів (ГВС) в об'єкті контролю (ОК). Для класичних конструкцій НВСП притаманний нелінійний неоднорідний розподіл ГВС, що обумовлює неоднорідну чутливість таких перетворювачів до дефектів. Намагання реалізації близького до ідеального розподілу ГВС призвело до появи розмаїття конструкцій НВСП [1-5] з більш досконалими системами збудження (СЗ), досить детальний аналіз яких міститься в статті [6]. Загальним для всіх цих досліджень є розгляд нерухомих відносно ОК перетворювачів. Якщо швидкість переміщення НВСП v перевищує 30 м/с, то розподіл ГВС в ОК зміню-

ється внаслідок індукування додаткових вихрових струмів (ВС) та виникає необхідність врахування так званого ефекту швидкості, викликаного струмами перенесення. Перші спроби синтезу рухомих НВСП з однорідним розподілом ГВС в ОК, а відповідно однаковою чутливістю до дефектів, зроблено у роботі [7], де розглядалися перетворювачі з коаксіальними планарними СЗ. Отримані результати спонукають до подальшого вдосконалення СЗ НВСП, зокрема оцінки можливості використання об'ємних СЗ як більш перспективних задля створення однорідних НВСП.

Мета роботи – розробка методу нелінійного параметричного сурогатного синтезу рухомих НВСП з об'ємною структурою збудження, які забезпечують однорідний розподіл ГВС на поверхні в зоні контролю об'єкту з врахуванням ефекту швидкості, що реалізується стохастичним метаевристичним алгоритмом пошуку глобального оптимуму екстремальної задачі.

Постановка задачі оптимального синтезу. Задача оптимального синтезу НВСП, що має однорідну чутливість в зоні контролю, є нелінійною оберненою задачею (ОЗ) математичного моделювання,

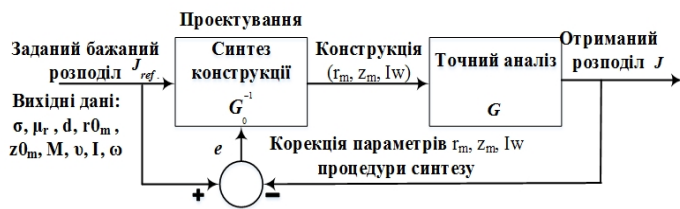


Рис. 1

основні етапи розв'язання якої показано на рис. 1. Вихідними даними для проектування є електрофізичні та геометричні характеристики об'єкту (електрична провідність σ , відносна магнітна проникність μ_r , товщина d ОК), певні параметри СЗ НВСП (радіуси $r0_m$ котушок збудження, висоти їхнього розташування $z0_m$ над ОК, кількість секційних котушок M , швидкість руху \vec{v} перетворювача відносно ОК, струм збудження I з круговою частотою ω), бажаний розподіл ГВС в зоні контролю, а результатом – варіант конструкції СЗ, який має в ідеалі оптимальні структуру та її технічні характеристики (r_m, z_m, Iw). Блок “Точний аналіз” на рис. 1 слід асоціювати з розв'язком прямої задачі визначення розподілу ГВС в ОК, геометричну модель якої показано на рис. 2.

Формулювання такої задачі проектування НВСП здійснюється в варіаційній (оптимізаційній) постановці, тобто шляхом мінімізації квадратичного функціонала у вигляді різниці між бажаними значеннями ГВС J_{ref} в контрольних точках зони ОК та відповідною ГВС J , створеною котушками СЗ НВСП в тих самих точках [8]. Гомогенна об'ємна СЗ являє собою сукупність послідовно з'єднаних секційних котушок з внутрішнім та зовнішнім радіусами r_1 і r_2 й прямокутним перетином, ширина та висота якого визначаються лінійними розмірами a, b . Котушки живляться змінним струмом I частотою ω з відповідним включенням зустрічним або узгодженим “по полю” та розташовані на висоті z_{mi} над ОК (рис. 2). Розв'язком задачі є параметри об'ємної СЗ, а саме середні радіуси котушок збудження (КЗ) r_{mi} , їхня середня висота z_{mi} розташування над ОК та значення магніторушійної сили Iw_i для кожної котушки, що забезпечують наперед заданий розподіл ГВС на поверхні в зоні контролю.

СЗ НВСП, отримані в результаті синтезу, в загальному випадку є об'ємні, але можуть включати до своєї структури коаксіальні секційні котушки, що розташовані на одній висоті над ОК, застосування яких за відповідної схеми включення дає змогу зменшити нерівномірність розподілу ГВС.

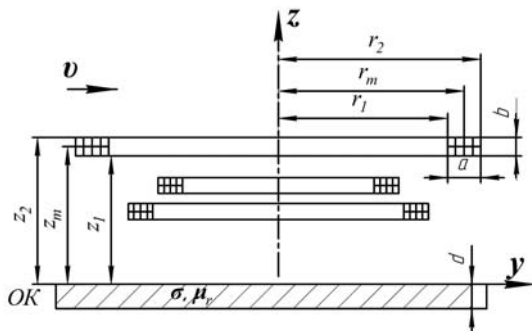


Рис. 2

Розв'язок прямої задачі електродинаміки.

Аналітичний розв'язок системи рівнянь Максвелла за умови неперервності тангенціальної складової напруженості магнітного поля та нормальної складової магнітної індукції на границях розділу середовищ дає розподіл комплексних компонент магнітної індукції B_{2x}, B_{2y}, B_{2z} в середовищі ОК із врахуванням швидкості руху НВСП [9]. Математична модель одинарної КЗ НВСП з нескінченно малим перетином отримана за наступних припущень: середовище ОК лінійне, однорідне, ізотропне; ОК рухомий зі сталою швидкістю $\vec{v} = (v_x, v_y, 0)$, струмопровідний з електрофізичними параметрами електричної провідності σ , відно-

сної магнітної проникності μ_r , нескінченної ширини і довжини та має кінцеву товщину d . Математичну модель для тонкого витка використано задля створення моделі КЗ із прямокутним поперечним перетином, отриманої додатковим інтегруванням по площі перетину за умови сталої густини струму в ньому. Тоді складові ГВС за просторовими координатами x , y відповідно визначаються за формулами

$$J_x = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \left[\frac{\partial}{\partial y} \left[j \cdot \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I \cdot w}{8 \cdot \pi^2 \cdot a \cdot b} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\xi^2 + \eta^2}{\eta \cdot \gamma \cdot (1 - e^{2\gamma d})} \cdot \left[\left\{ -(1 + \lambda_0) \cdot e^{2\gamma d} + \nu_0 \cdot e^{(\gamma \sqrt{\xi^2 + \eta^2})d} \right\} \cdot e^{\gamma z} - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - \left\{ 1 + \lambda_0 - \nu_0 \cdot e^{(\gamma \sqrt{\xi^2 + \eta^2})d} \right\} \cdot e^{-\gamma z} \right] \cdot e^{-j(x\xi + y\eta)} \cdot I_s(r_m, a) \cdot I_E(z_m, b) d\xi d\eta \right] - \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I \cdot w}{8 \cdot \pi^2 \cdot a \cdot b} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(1 - e^{2\gamma d})} \cdot \left[\left\{ -(1 + \lambda_0) \cdot e^{2\gamma d} + \nu_0 \cdot e^{(\gamma \sqrt{\xi^2 + \eta^2})d} \right\} \cdot e^{\gamma z} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \left\{ 1 + \lambda_0 - \nu_0 \cdot e^{(\gamma \sqrt{\xi^2 + \eta^2})d} \right\} \cdot e^{-\gamma z} \right] \cdot e^{-j(x\xi + y\eta)} \cdot I_s(r_m, a) \cdot I_E(z_m, b) d\xi d\eta \right] \right] \quad (1)$$

$$J_y = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \left[\frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I \cdot w}{8 \cdot \pi^2 \cdot a \cdot b} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\xi}{\eta \cdot (1 - e^{2\gamma d})} \cdot \left[\left\{ -(1 + \lambda_0) \cdot e^{2\gamma d} + \nu_0 \cdot e^{(\gamma \sqrt{\xi^2 + \eta^2})d} \right\} \cdot e^{\gamma z} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \left\{ 1 + \lambda_0 - \nu_0 \cdot e^{(\gamma \sqrt{\xi^2 + \eta^2})d} \right\} \cdot e^{-\gamma z} \right] \cdot e^{-j(x\xi + y\eta)} \cdot I_s(r_m, a) \cdot I_E(z_m, b) d\xi d\eta \right] - \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial x} \left[j \cdot \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I \cdot w}{8 \cdot \pi^2 \cdot a \cdot b} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\xi^2 + \eta^2}{\eta \cdot \gamma \cdot (1 - e^{2\gamma d})} \cdot \left[\left\{ -(1 + \lambda_0) \cdot e^{2\gamma d} + \nu_0 \cdot e^{(\gamma \sqrt{\xi^2 + \eta^2})d} \right\} \cdot e^{\gamma z} - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - \left\{ 1 + \lambda_0 - \nu_0 \cdot e^{(\gamma \sqrt{\xi^2 + \eta^2})d} \right\} \cdot e^{-\gamma z} \right] \cdot e^{-j(x\xi + y\eta)} \cdot I_s(r_m, a) \cdot I_E(z_m, b) d\xi d\eta \right] \right] \quad (2)$$

$$\text{де } \gamma = \sqrt{\xi^2 + \eta^2 - j \cdot \sigma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot (v_x \cdot \xi + v_y \cdot \eta) + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}; \lambda_0 = \frac{\{\gamma^2 - \mu_r^2 \cdot (\xi^2 + \eta^2)\} \cdot (1 - e^{-2\gamma d})}{(\gamma + \mu_r \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2})^2 - (\gamma - \mu_r \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2})^2} \cdot e^{-2\gamma d};$$

$$\nu_0 = \frac{4 \cdot \mu_r \cdot \gamma \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \cdot e^{(\sqrt{\xi^2 + \eta^2} - \gamma)d}}{(\gamma + \mu_r \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2})^2 - (\gamma - \mu_r \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2})^2} \cdot e^{-2\gamma d}; I_s(r_m, a) = \int_{-a/2}^{a/2} -j \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot (r_m + p) \cdot \eta}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot J_1((r_m + p) \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}) dp;$$

$$I_E(z_m, b) = \int_{z_m - b/2}^{z_m + b/2} e^{-q\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} dq = \frac{e^{z_m \sqrt{\xi^2 + \eta^2}}}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot \left(e^{-\frac{b}{2}\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} - e^{\frac{b}{2}\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \right); J_1 - \text{функція Беселя 1-го роду 1-го порядку}$$

від комплексного аргументу; $a = r_2 - r_1$; $b = z_2 - z_1$; $r_m = (r_1 + r_2)/2$; $z_m = (z_1 + z_2)/2$ – середнє значення радіусу та висоти розташування котушки відповідно; ξ , η , p , q – змінні інтегрування.

Частинні похідні в попередніх виразах легко взяти аналітично, але внаслідок громіздкості кінцеві результати в статті не наведено. Як показали результати досліджень [7], використання “точних” електродинамічних моделей (1, 2), що містять невласні кратні інтеграли 1-го роду та досить складні інтеграли зі спеціальними функціями Беселя в підінтегральних виразах, в задачі оптимального синтезу НВСП недоцільно, оскільки їхній обрахунок є вельми ресурсоємним по часу навіть без врахування чисельного розрахунку інтеграла $I_s(r_m, a)$. Тому має сенс застосування технології сурогатної оптимізації, яка добре зарекомендувала себе у разі розв’язку таких ресурсоємних задач [7, 8]. «Точні» математичні моделі використовуються в сурогатній оптимізації тільки для побудови моделі-замісника

(метамоделі) та вже на завершальному етапі проектування, а саме задля перевірки адекватності отриманої синтезованої СЗ НВСП, і не застосовуються на етапі пошуку екстремуму.

Побудова метамоделі. В досліджуваному випадку метамодель є функцією чотирьох аргументів – просторових координат x, y , радіусів КЗ та висот їхнього розташування над ОК. Загальна технологія побудови метамоделей із застосуванням штучного інтелекту, зокрема RBF-нейронних мереж (НМ), висвітлювалася авторами в роботах [7, 8] і була успішно реалізована на різноманітних прикладах як для двовимірного, так і багатовимірного факторного простору. Задля отримання необхідної точності метамоделі вже за трьох її аргументах доводиться застосувати різноманітні методи побудови НМ такі, як множинні НМ з усередненням по ансамблю, підсиленням (boosting) [8], адитивну НМ регресію та використовувати техніку розбиття факторного гіперпростору на множину простіших задач із різними вимогами до точності апроксимації з наступним об'єднанням окремих метамоделей в єдину безперервну [7]. Враховуючи нелінійність та нерегулярну поведінку гіперповерхні відгуку, задля створення метамоделі використано гібридний підхід, коли одночасно застосувалися технології декомпозиції області пошуку та НМ, побудовані на техніках асоціативних машин із груповими методами отримання рішення. Декомпозиція простору пошуку має сенс, оскільки, по-перше, для процедури адекватного навчання RBF-мереж із чотирма змінними необхідна велика кількість прикладів; по-друге, в діапазоні зміни радіуса існує великий розмах значень ГВС безпосередньо в області під котушкою та поза нею. Все це унеможливає використання глобальної RBF-нейромережі через велику похибку для отриманої таким чином метамоделі. Тому простір пошуку розбивається на декілька підобластей: по висоті розташування НВСП над ОК – I_z ($2 \leq z \leq 3$ мм), II_z ($3 < z \leq 4$ мм) та по радіусу котушки – I_r ($2 \leq r \leq 5$ мм), II_r ($5 < r \leq 7$ мм), III_r ($7 < r \leq 9$ мм), IV_r ($9 < r \leq 11$ мм), V_r ($11 < r \leq 13$ мм), VI_r ($13 < r \leq 15$ мм). Побудова метамоделей виконується в кожній окремій підобласті і кінцева сурогатна модель отримується за допомогою «зшивки» складових частин. З цих же причин кількість вузлових для апроксимації точок плану експерименту (ПЕ) задається для кожної підобласті факторного простору різною відповідно до поведінки гіперповерхні відгуку з метою максимально точного її відтворення.

Вихідні дані для побудови метамоделі: $x = -45 \dots 45$ мм; $y = 0 \dots 35$ мм, радіуси КЗ $r = 2 \dots 15$ мм, висоти їхнього розташування над ОК $z_m = 2 \dots 4$ мм. Також задаємося геометричними та електрофізичними параметрами ОК: $d = 10$ мм, $\sigma = 3,745 \cdot 10^7$ См/м, $\mu_r = 1$, швидкістю руху перетворювача відносно ОК $v = (40; 0; 0)$ м/с та частотою струму збудження $f = 5$ кГц.

Суттєве значення задля створення прийнятної за точністю метамоделі має ПЕ. Основним критерієм під час вибору комп'ютерного ПЕ серед множини наявних є можливість генерації точок, які рівномірно заповнюють простір пошуку, що збільшує ймовірність їхнього потраплення в області екстремумів чи перегинів гіперповерхні відгуку [10]. Під час створення багатовимірних планів виникають певні складнощі, з одного боку необхідно обмежитися мінімальною кількістю використовуваних точок спостереження, а з іншого кількість інформації, яку можна отримати за допомогою відібраних точок, повинна бути максимальною. Тому важливо забезпечити рівномірний розподіл точок в гіперпаралелепіпеді мінімальною їхньою кількістю. Серед одновимірних квазівипадкових розширюваних послідовностей, що характеризуються низькою узагальненою розбіжністю та зменшеною ймовірністю до локальної негомogeneousності, найкращою вважається ЛП₇-послідовність Соболя. Але з врахуванням переваг, які відзначено авторами в [11], в даному дослідженні застосовано багатовимірний ПЕ на основі квазівипадкової безпараметричної адитивної R₄-послідовності Кронекера з використанням ірраціональних чисел, які отримано на основі узагальненої послідовності Фібоначчі. Якість розподілу оцінюється за показниками центрованої та циклічної розбіжностей для N точок плану в чотиривимірному просторі. Реалізація R₄-послідовностей спочатку виконана в одиничному гіперкубі із кількістю точок $N=1250$ (табл.), що відповідно мають центровану розбіжність – $2.160538 \cdot 10^{-4}$ та циклічну розбіжність – 6.321335. Деякі проєкції розподілу точок проілюстровано на рис. 3. Далі виконано масштабування отриманих R₄-послідовностей на діапазон абсолютних величин змінних, що зазначені вище.

№ п/п	1	2	3	4	5	...	1248	1249	1250
x	0.357	0.213	0.07	0.927	0.783	...	0.63	0.487	0.344
y	0.234	0.968	0.702	0.436	0.169	...	0.397	0.131	0.865
r	0.129	0.757	0.386	0.015	0.644	...	0.126	0.755	0.383
z	0.039	0.577	0.116	0.654	0.193	...	0.669	0.208	0.747

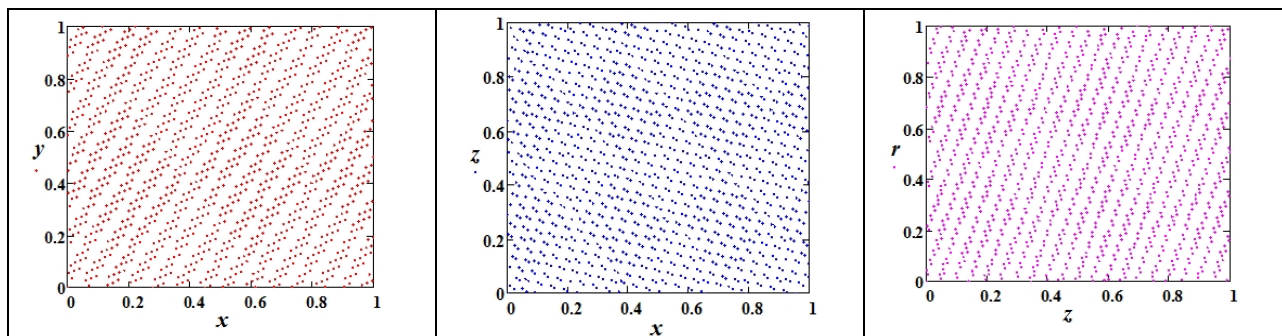


Рис. 3

Особливості та верифікація отриманої метамоделі. Прийнятну точність метамоделі отримано із застосуванням адитивної НМ регресії [12] у разі побудови декількох каскадів НМ з наступним додатковим використанням на кожному каскаді комітетів тільки для мереж, що мають продуктивність понад 90 %. Задане значення середньої відносної модельної похибки (або середньої похибки апроксимації) $MAPE$ на рівні 25 % обумовлює складність такої НМ, тобто кількість каскадів нарощується до тих пір, поки не буде досягнуто необхідної точності. Задля формування підвбірок застосовано процедуру бегінгу [12] для кожної декомпозиційної підобласті. З метою відбору найкращих створені таким чином метамоделі оцінювалися за показниками коефіцієнту детермінації R^2 , відношення стандартних відхилень $S.D.ratio$; $MAPE, \%$. Тоді як відтворена поверхня відгуку оцінювалася додатково ще за наступними показниками адекватності: суми квадратів відповідно регресії, залишків, загальної; середніх квадратів тих самих показників; дисперсії відтворюваності, адекватності, загальної; стандартної похибки оцінки відтворюваності, оцінки адекватності, загальної [13]. На рис. 4 наведено лінії рівня зрізів поверхні відгуку, відтворені на точках $N_{відтв} > N_{навч}$ для підобластей II_z-I_r , II_z-III_r , I_z-VI_r , що мають $MAPE$ відповідно 6.22 %, 9.89 %, 25.52 %. Для інших підобластей похибка $MAPE$ знаходиться у вказаних граничних межах.

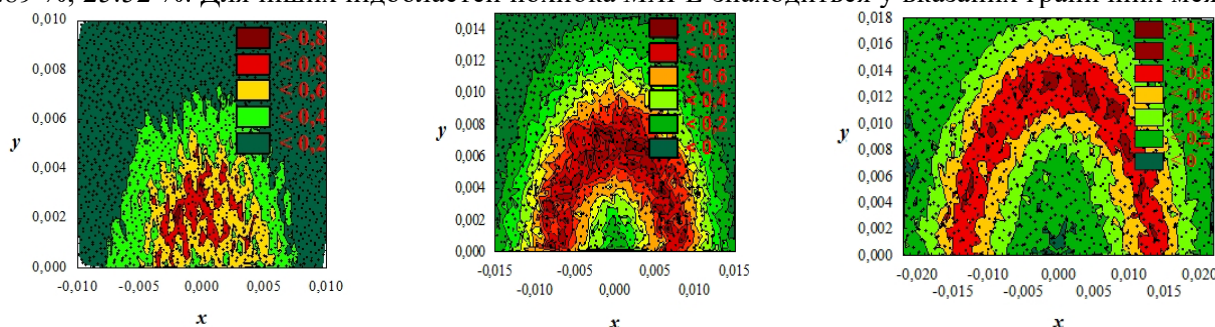


Рис. 4

Оптимальний синтез СЗ. Реалізація задачі оптимального нелінійного синтезу відбувалася із застосуванням створених метамоделей, тобто виконувалася сурогатна оптимізація. При цьому одночасно визначалися всі шукані параметри СЗ. Розв'язок нелінійної ОЗ отримано стохастичними алгоритмами пошуку глобального екстремуму, а саме гібридним алгоритмом на основі генетичного з локальним пошуком симплексним методом Нелдера-Міда та популяційним метаевристичним алгоритмом оптимізації роєм частинок з еволюційним формуванням складу рою, що являє собою низькорівневу гібридизацію генетичного алгоритму й алгоритму PSO. Чисельні результати синтезу НВСП за апріорі заданого П-подібного розподілу ГВС в зонах контролю $7 \text{ мм} \leq r \leq 20 \text{ мм}$ та $5 \text{ мм} \leq r \leq 20 \text{ мм}$ для трьох об'ємних СЗ НВСП зі структурами з 3-х, 4-х та 5-х котушок показано на рис. 5. Кількість контрольних точок у функціоналі складала $N_k=60$, вони розташовувалися рівномірно на поверхні ОК в області адекватності метамоделі. Конструкції синтезованих СЗ перетворювачів показано схематично на рис. 5, а. Для даних СЗ за «точними» математичними моделями отримано розподіли ГВС вздовж осі Ox (графік 1 на рис. 5, б). Для порівняння там же наведено бажаний розподіл ГВС (графік 2) та розподіли, утворені одинарним витком, що має радіус 15 мм та розташований на висотах 2 та 4 мм над ОК відповідно (графіки 3, 4). Також для наочності синтезований розподіл ГВС представлено у вигляді ліній рівня (рис. 5, в).

Спостерігається певне невиконання умов синтезу щодо інтенсивності ГВС в зоні контролю, яких не вдається уникнути у разі послідовного ускладнення структури СЗ. Але цей факт не є

критичним тому, що позитивні тенденції щодо зони однорідності розподілу ГВС є стійкими та саме це є надважливим. Також очевидними в цьому сенсі є переваги синтезованих СЗ перед їхніми класичними аналогами-одинарними витками. Порівняльний аналіз НВСП із планарними [7] та об'ємними коаксіальними СЗ свідчить щодо більших потенційних можливостей останніх задля забезпечення вимог однорідності. Це можливо пояснити більшою варіабельністю структур СЗ, що обумовлено дозволенним просторовим розташуванням окремих секційних котушок.

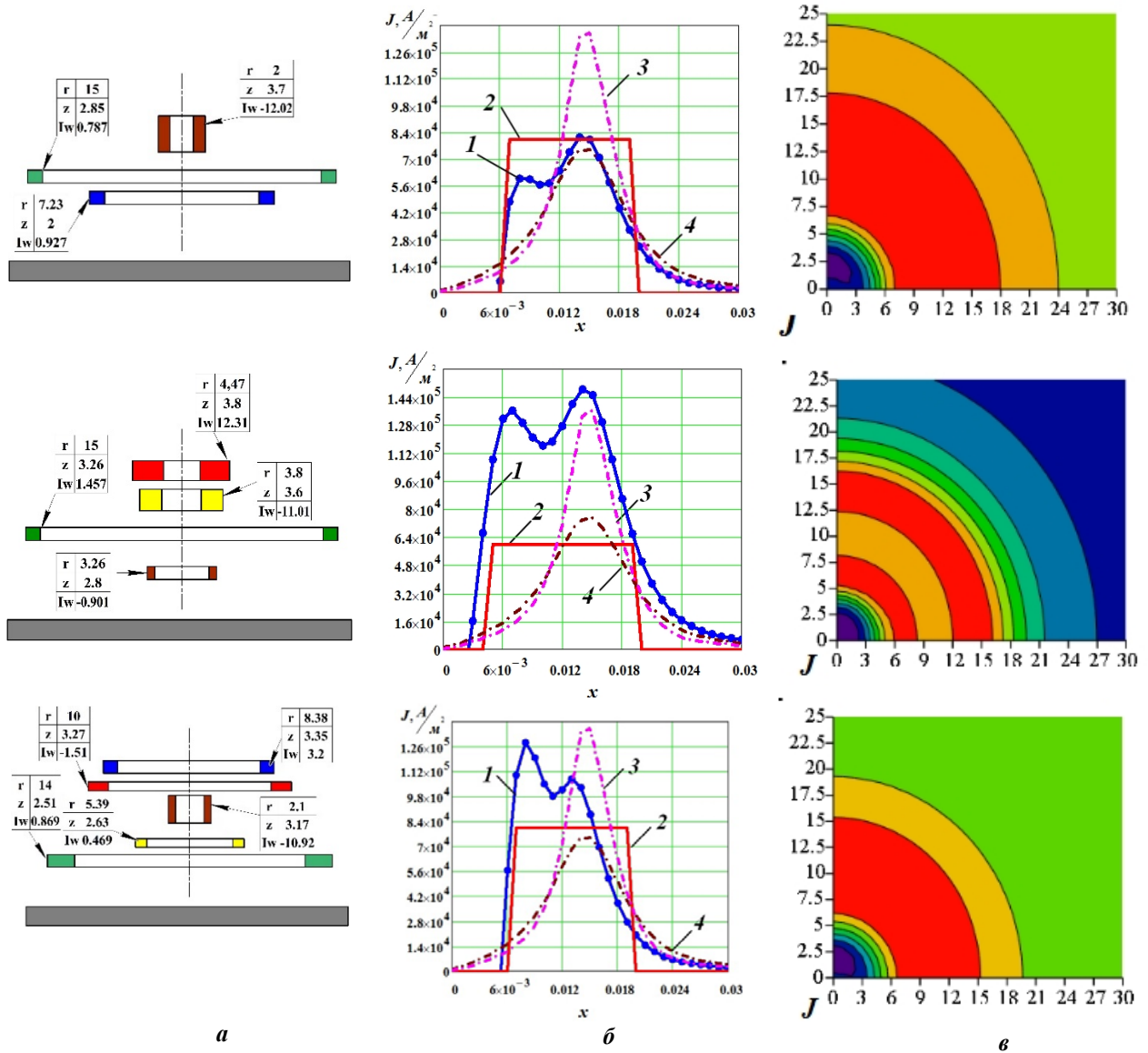


Рис. 5

Практична реалізація синтезованої СЗ НВСП. Проілюструємо викладене вище прикладами реального виготовлення СЗ перетворювача $M = 4$ ($Iw_1 = -0.901$, $Iw_2 = 1.457$, $Iw_3 = -11.01$, $Iw_4 = 12.31$), технічні параметри якої отримано внаслідок комп'ютерного моделювання за запропонованим методом синтезу апіорі заданого розподілу ГВС в ОК. Якщо розміщення у просторі секційних котушок СЗ з визначеними їхніми геометричними параметрами не викликає труднощів у конструюванні, забезпечення зустрічного або узгодженого “по полю” характеру їхнього включення достатньо просто виконується зміною напрямку секційної намотки (знак “мінус” означає протилежний напрямок), то питання виконання умов щодо реалізації магніторушійних сил в секційних котушках не є тривіальним. Найпростішим варіантом практичної реалізації НВСП з об'ємною структурою СЗ є її збудження від одного джерела. Враховуючи дійсні значення МРС, отримані в результаті обчислень, доводиться округлити кількість витків в секціях до цілих значень (наприклад, $I = 0.5$ А, $w_1 = -2$, $w_2 = 3$, $w_3 = -22$, $w_4 = 25$). Такі дії призводять до певного спотворення первинно отриманого розподілу ГВС в ОК, що потребує додаткового перевірного

розрахунку, результати якого наведено на рис. 6: *a* – розподіли ГВС синтезованої та реальної конструкцій, *б* – гістограма відносної похибки відтворення розподілу ГВС. Середня відносна похибка відтворення розподілу складає 3.65 %.

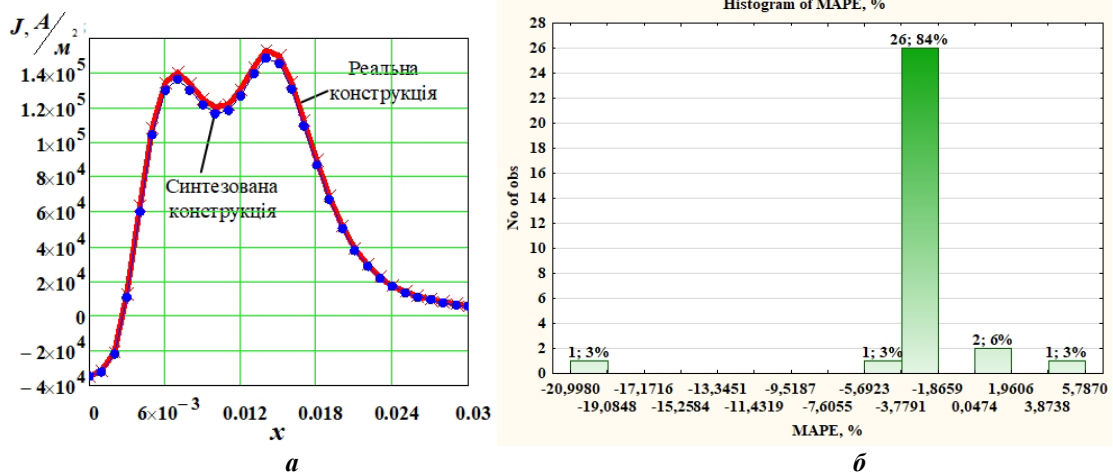


Рис. 6

Наступним способом практичної реалізації СЗ є варіант, ідея якого полягає в наступному. Джерело збудження СЗ характеризується струмом, який на порядок менший за розрахунковий. Отже, тоді кількість витків в секційних котушках, що з'єднані послідовно, збільшується відповідно на порядок та округляється до цілих значень ($I = 0.05$ А, $w_1 = -18$, $w_2 = 29$, $w_3 = -220$, $w_4 = 246$). Результати чисельних експериментів ілюструються графіками на рис.7: *a* – розподіли ГВС синтезованої та реальної конструкцій, *б* – гістограма відносної похибки відтворення розподілу ГВС. Середня відносна похибка відтворення розподілу складає 2 %.

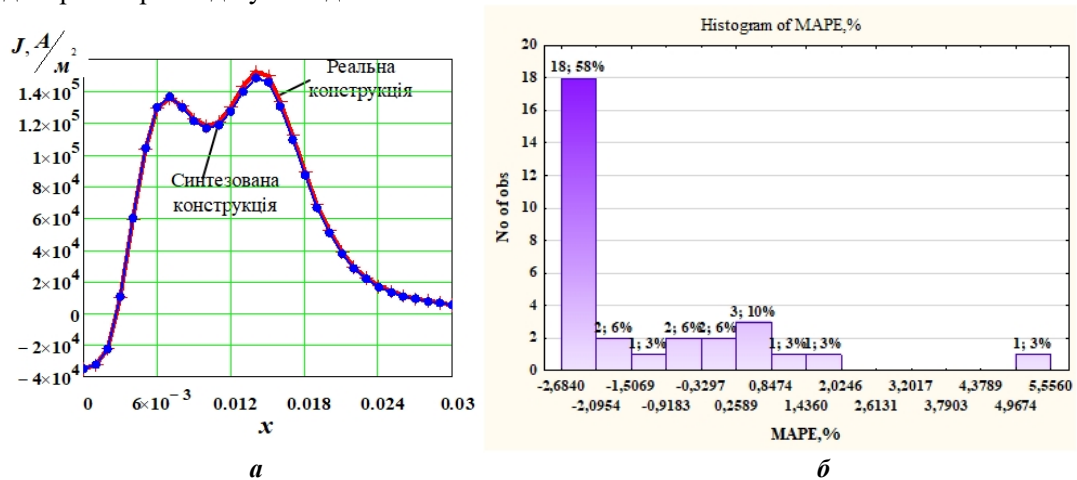


Рис. 7

Більш досконалим слід вважати спосіб практичної реалізації СЗ НВСП, коли її збудження здійснюється від двох джерел, струм в яких різняться на порядок. В цьому випадку намотка секційних котушок виконується двома дротами, одним з яких реалізуються обмотки, що містять цілу частину дійсних чисел кількості витків, а другим – обмотки, що є десятковими частинами тих самих дійсних чисел ($I_1 = 0.5$ А, $w_1 = -1$, $w_2 = 2$, $w_3 = -22$, $w_4 = 24$; $I_2 = 0.05$ А, $w_1 = -8$, $w_2 = 9$, $w_3 = 0$, $w_4 = 6$). Результати чисельного моделювання показано на рис. 8: *a* – розподіли ГВС синтезованої та реальної конструкцій, *б* – гістограма відносної похибки відтворення розподілу ГВС. Середня відносна похибка відтворення розподілу складає 0.89 %.

Слід зазначити, що ускладнення електронної схеми під час практичного виконання систем збудження та обробки сигналу НВСП досить легко уникнути використанням одного двоканального джерела збудження.

За необхідності кількість джерел збудження СЗ можна збільшувати, але накопичений досвід свідчить щодо достатності попередніх заходів задля забезпечення відтворюваності синтезованого розподілу ГВС.

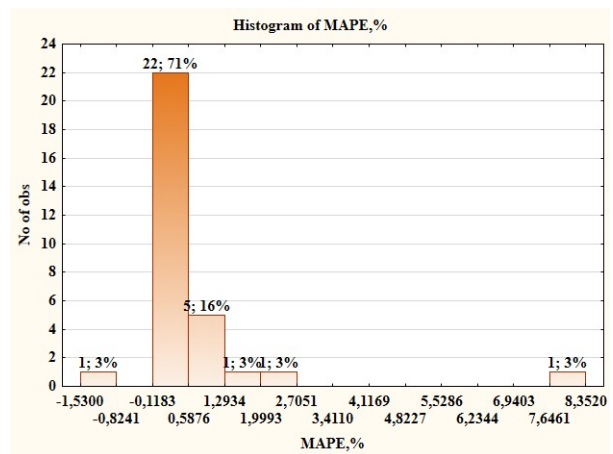
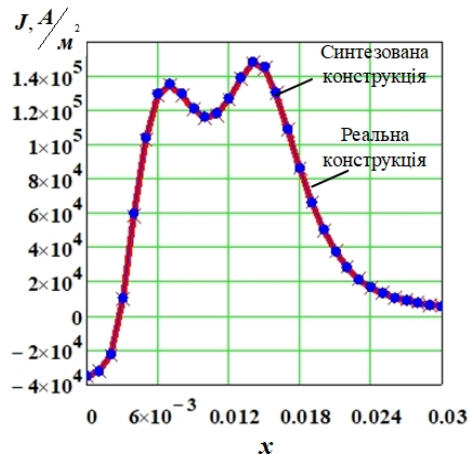


Рис. 8

Висновки. Запропоновано метод сурогатного нелінійного параметричного синтезу рухомих НВСП з об'ємною структурою збудження, що забезпечують близький до однорідного розподіл ГВС на поверхні в зоні контролю об'єкту з врахуванням ефекту швидкості та реалізують однакову чутливість до дефектів. Розроблено алгоритми та програмні засоби реалізації методу, зокрема розрахунків прямої задачі за «точною» електродинамічною моделлю, створення RBF-метамodelей, методик покращення їхніх апроксимаційних можливостей в гіперпросторі, ефективних багатовимірних комп'ютерних ПЕ з низькими показниками центрованої та циклічної розбіжностей, сучасних популяційних метаевристичних стохастичних гібридних алгоритмів пошуку глобального екстремуму, чисельної технології умовної сурогатної оптимізації.

На чисельних експериментах продемонстровано переваги синтезованих СЗ НВСП з об'ємною структурою перед їхніми класичними аналогами, а також СЗ із планарною структурою. Наведено приклади практичної реалізації СЗ НВСП з об'ємною структурою.

SYNTHESIS OF EDDY CURRENT PROBES WITH VOLUMETRIC STRUCTURE OF THE EXCITATION SYSTEM, IMPLEMENTING HOMOGENEOUS SENSITIVITY IN THE TESTING ZONE

V.Ya. Halchenko, R.V. Trembovetska, V.V. Tychkov
 Cherkasy State Technological University,
 460, Shevchenko Blvd., Cherkasy, 18006, Ukraine.
 E-mail: v.tychkov@chdtu.edu.ua

A method for nonlinear surrogate synthesis of surface eddy current probes with a volumetric structure of the excitation system was proposed. This method a priori provides a given uniform distribution of eddy current density in the testing object area where the measuring coil is located. The implementation of the task using modern metaheuristic stochastic algorithms for finding the global extremum was achieved. For the effective usage of such algorithms, taking into account the effect of velocity, metamodels of eddy current probe were preliminarily created. They were built using a productive approximation technique based on artificial radial-basis neural networks with a Gaussian activation function. Acceptable accuracy of metamodels was achieved due to the simultaneous application of the search area decomposition technologies and plural neural networks based on the techniques of associative machines with group methods for obtaining a solution. For metamodels creation a multidimensional computer experiment design with high homogeneity was used on the basis of the parameterless additive R_d -Kronecker sequence. Numerical experiments to determine the eddy current density distributions which formed by synthesized excitation structures were carried out. The advantages of using a three-dimensional structure excitation system in comparison with classical and planar ones in terms of increasing the width of the testing zone, which is characterized by uniform sensitivity, were shown. Examples of practical implementation of an excitation system with a volumetric structure for an surface eddy current probe are given. References 13, figures 8, table 1.

Key words: eddy-current probe, eddy current density, velocity effect, excitation system, homogeneous sensitivity, surrogate optimization, RBF-metamodel, parameterless additive R_d -sequence, stochastic algorithm global extremum finding.

1. 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. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19020397>
2. Ribeiro A.L., Ramos H.G., Postolache O. A simple forward direct problem solver for eddy current non-destructive inspection of aluminum plates using uniform field probes. *Measurement*. 2012. Vol. 45. No 2. Pp. 213-217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.03.029>
3. Postolache O., Lopes A., Ramos H.G. GMR array uniform eddy current probe for defect detection in conductive specimens. *Measurement*. 2013. Vol. 46. Pp. 4369–4378. DOI: <https://doi.org/10.1109/IMTC.2010.5488189>
4. Hoshikawa H., Koyama K., Mitsuhashi S. Eddy Current and Magnetic Testing of Magnetic Material by Uniform Eddy Current Probe. *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*. 2005. Vol. 24. Pp. 494-501. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5339-7_137
5. Li Y., Ren S., Yan B., Zainal Abidin I.M., Wang Y. Imaging of Subsurface Corrosion Using Gradient-Field Pulsed Eddy Current Probes with Uniform Field Excitation. *Sensors*. 2017. Vol. 17. Article № 1747. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17081747>
6. 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. Pp. 91-104. DOI: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2020-11-2-91-104>
7. 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. Pp. 76-82. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2019.09.15>
8. Halchenko V.Ya., Trembovetskaya R.V., Tychkov V.V. Development of excitation structure RBF-metamodels of moving concentric eddy current probe. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2019. No 2. Pp. 28-38. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.2.05>
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. Pp. 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), 2018. 446 p.
11. 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. Pp. 70-76. DOI: <https://doi.org/10.2478/acss-2020-0009>
12. Géron A. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems. 2nd Edition. O'Reilly Media, Inc. 2019. 856 p.
13. Brink H., Richards J., Feverolf M. Machine Learning. Sankt-Peterburg: Peter, 2017. 336 p. (Rus.)

Надійшла 20.08.2020
Остаточний варіант 04.01.2021