

В.Я. Гальченко, Р.В. Трембовецька, В.В. Тичков

ПОБУДОВА RBF-МЕТАМОДЕЛЕЙ СТРУКТУР ЗБУДЖЕННЯ РУХОМОГО КОНЦЕНТРИЧНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Розроблено програмне забезпечення для розрахунку розподілу густини вихрових струмів в зоні контролю накладного вихрострумowego перетворювача із врахуванням ефекту швидкості за «точними» електродинамічними математичними моделями. Розроблено програмне забезпечення для формування точок плану експерименту із використанням ЛПТ-послідовностей, що дозволило здійснювати відбір планів з рівномірним заповненням точками гіперпростору пошуку. Для нерухомого та рухомого накладних вихрострумowych перетворювачів створено нейромережеві метамоделі на радіально-базисній функції Гауса. Оцінено адекватність та інформативність отриманих метамоделей накладних вихрострумowych перетворювачів. Результати дослідження можуть бути використані при синтезі рухомих накладних вихрострумowych перетворювачів із априорі заданим розподілом густини вихрових струмів в зоні контролю. Бібл. 22, табл. 6, рис. 8.

Ключові слова: накладний вихрострумований перетворювач; розподіл густини вихрових струмів; структура збудження; математична модель; оптимальний синтез; комп'ютерний план експерименту; ЛПТ-послідовність; RBF-метамоделі; комітет нейронних мереж.

Разработано программное обеспечение для расчета распределения плотности вихревых токов в зоне контроля накладного вихрострумowego преобразователя с учетом эффекта скорости по «точным» электродинамическим математическим моделям. Разработано программное обеспечение для формирования точек плана эксперимента с использованием ЛПТ-последовательностей, что позволило осуществлять отбор планов с равномерным заполнением точками гиперпространства поиска. Для неподвижного и движущегося накладных вихрострумowych преобразователей созданы нейросетевые метамоделі на радиально-базисной функции Гауса. Оценены адекватность и информативность полученных метамоделей накладных вихрострумowych преобразователей. Результаты исследования могут быть использованы при синтезе движущихся накладных вихрострумowych преобразователей с априорі заданным распределением плотности вихревых токов в зоне контроля. Библ. 22, табл. 6, рис. 8.

Ключевые слова: накладной вихрострумовой преобразователь; распределение плотности вихревых токов; структура возбуждения; математическая модель; оптимальный синтез; компьютерный план эксперимента; ЛПТ-последовательность; RBF-метамоделі; комитет нейронных сетей.

Вступ. Вихрострумований метод контролю та прилади на його основі знаходять широке застосування для визначення параметрів різноманітних об'єктів контролю (ОК): дефектів несущальності матеріалу, контролю розмірів ОК і параметрів вібрацій, контролю якості термічної і хіміко-термічної обробки деталей, стану поверхневих шарів після механічної обробки, наявності залишкових механічних напружень, реконструкції розподілу електропровідності та магнітної проникності всередині об'єктів та інші.

Поряд із вагомими перевагами вихрострумовому методу контролю притаманні деякі недоліки, наприклад, можливість контролю тільки струмопровідних об'єктів, відносно мала глибина проникнення вихрових струмів, неоднорідна чутливість перетворювачів класичних конструкцій.

Класичним накладним вихрострумовим перетворювачам (НВСП) властивий характерний розподіл густини вихрових струмів (ГВС) в ОК, який залежить від геометричних, електромагнітних параметрів та взаємного розташування його збуджуючої котушки відносно контрольованої поверхні. В НВСП ГВС максимальна в поверхневому шарі струмопровідного об'єкту та зменшується при віддаленні від витків котушки збудження вздовж поверхні (рис. 1,а) і в більш глибоких шарах за експоненціальним законом. Тобто при такому неоднорідному розподілі ГВС (рис. 1,а) взаємне розташування НВСП відносно ОК суттєво впливає на чутливість методу. В дефектоскопії, наприклад, у випадку розташування поверхневої тріщини кінцевої довжини під геометричним центром котушки збудження чутливість буде близькою до нуля (рис. 1,в), мінімальна чутливість спостерігається для

випадку розташування поверхневої тріщини паралельно до вихрових струмів (рис. 1,з); максимальна – якщо тріщина перпендикулярна до напрямку вихрових струмів (рис. 1,д).

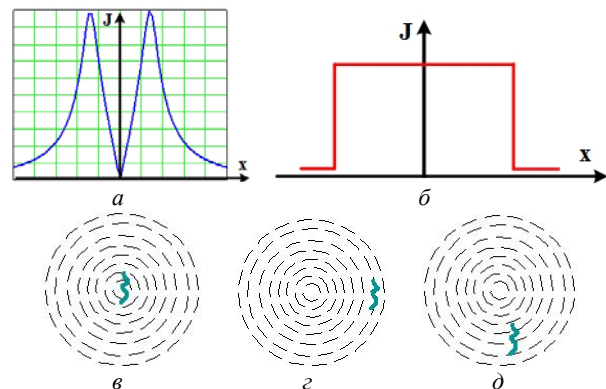


Рис. 1. Особливості НВСП: розподіл ГВС, притаманний класичним конструкціям перетворювачів (а); рівномірний розподіл ГВС (б); чутливість близька до нуля (в); мінімальна чутливість (з); максимальна чутливість (д)

Для того, щоб зменшити ефект залежності чутливості перетворювача до дефекту незалежно від його розташування в зоні контролю, бажано мати розподіл ГВС в ній однорідним (рис. 1,б). Виникає задача створення НВСП з однорідною чутливістю, а відповідно й однорідним розподілом ГВС в зоні контролю об'єкту. Дану задачу можливо вирішити в рамках задачі оптимального синтезу в результаті визначення раціональної структури системи збудження НВСП з відповідними параметрами, що забезпечують необ-

© В.Я. Гальченко, Р.В. Трембовецька, В.В. Тичков

хідний розподіл ГВС. Важливо також досягнути однорідної чутливості НВСП, які не тільки нерухомі відносно ОК чи переміщуються з невеликою швидкістю, коли ефектом виникнення струмів переносу можна знехтувати, але й для рухомих перетворювачів.

Огляд літератури. В роботі [1] розглядаються задачі лінійного синтезу нерухомого НВСП, де в якості вихідних даних приймається залежність вихідного сигналу від зазору чи питомої електричної провідності досліджуваного об'єкту. Для розв'язку некоректної задачі синтезу застосовано метод регуляризації, тобто на шукані функції введено певні обмеження. В роботі [2] розглянуті питання лінійного синтезу нерухомого НВСП. Площина зони контролю паралельна до робочого торця перетворювача, де і створювалася задана структура магнітного поля. В роботі [3] представлений алгоритм нелінійного синтезу магнітних полів збудження нерухомого НВСП з попередньо визначеною їх конфігурацією. Рішення задачі отримано шляхом мінімізації середньостепеневої апроксимації мінімаксного функціоналу, що забезпечує мінімальне відхилення шуканого розподілу електромагнітного поля від заданого. В роботі [4] виконано структурно-параметричний синтез системи збудження нерухомого НВСП. Шуканими параметрами є кількість секцій, їх радіуси та координати. Пошук оптимального рішення виконувався за допомогою генетичного алгоритму. Отримані оптимальні значення параметрів секцій котушок, а також найбільш конструктивно прості системи збудження, які забезпечують заданий розподіл зондуючого поля в просторі. Досягнуто значне покращення якості генерованого поля синтезованої магнітної системи, суттєве спрощення структури за кількістю секцій та зменшення довжини системи, а також зменшено кількість витків в секціях при однакових значеннях струмів. В роботі [5] запропоновано методологію оптимізації конструкції котушки вихрострумowego перетворювача (ВСП), яка дозволяє максимально наблизитися до ідеального поля збудження в багатоцільовій постановці задачі. В дослідженнях представлений спосіб оптимізації конструкції системи збудження для отримання тангенціального і рівномірного розподілу мультилінійних вихрових струмів. В роботі [6] розроблено метод оптимізації параметрів котушки збудження шляхом рішення багато-параметричної багатоцільової задачі оптимізації. Здійснено імітаційне моделювання поведінки нескінченної котушки з тангенціальним рівномірним полем на поверхні ОК. В результаті отримана нерівномірна багатопараметрична конструкція котушки ВСП, яка забезпечує однорідне поле збудження. В роботі [7] застосовано генетичний алгоритм вирішення оптимізаційної задачі вибору параметрів поля збудження ВСП. Для котушки збудження перетворювача отримано оптимальні значення частоти та розміри.

Таким чином, раніше опубліковані дослідження, присвячені питанням синтезу ВСП [1-7] із заданою конфігурацією зондуючого поля в зоні контролю, розглядали нерухомі ОК та не враховували реакцію електропровідного середовища. При цьому достатньо було створити системи збудження НВСП із рівномірним розподілом електромагнітного поля, що гарантовано забезпечувало рівномірний розподіл ГВС в ОК. Врахування швидкісного ефекту передбачає синтез однорідного розподілу ГВС в середовищі ОК, що є принциповою відмінністю

від результатів попередніх досліджень і не може бути здійснено запропонованими раніше засобами.

Мета та задачі дослідження. Об'єкт дослідження – процеси вихрострумowego контролю якості об'єктів. Предмет дослідження – рухомий круговий НВСП з однорідним розподілом ГВС в зоні контролю. Мета роботи – створення RBF-метамоделі рухомого концентричного кругового НВСП, яку можна використовувати для розрахунку розподілу ГВС в області контрольної зони та придатної для використання в задачах оптимального синтезу.

Математична модель рухомого НВСП. В якості початкових вихідних даних для проектування в задачі синтезу НВСП в загальній постановці використовується апріорі заданий бажаний розподіл ГВС $J_{reference}$ в зоні контролю. З метою деякого спрощення задачі обмежимся спочатку отриманням даного розподілу ГВС на поверхні ОК, задаючи певними значеннями ГВС у сукупності N контрольних точок O .

Структура збудження НВСП складається із системи M котушок із різноманітною висотою розташування z_{0k} , $k = 1 \dots M$ відповідної котушки відносно ОК та радіусами r_k . Схема їх включення – зустрічна або узгоджена, а струм живлення I може бути як однаковим, так і різним для кожної із котушок. Як варіант структури збудження на рис. 2,а показана система концентричних котушок із різними радіусами, що розташована на однаковій висоті z_0 над ОК. На рис. 2,б показана система збудження із котушок різних радіусів, що розташовані на однаковій висоті, при цьому центри котушок зміщені, тобто котушки не концентричні. Рис. 2,в демонструє систему котушок із різними радіусами, котрі розташовані на різних висотах та зі зміщенням центрів одного відносно інших.

В [8-13] розроблено математичну модель одиної котушки збудження НВСП, що дозволяє визначити розподіл ГВС в ОК, яку домовимося називати «точною». Для цього прийнято наступні припущення: середовище лінійне, однорідне, ізотропне; ОК рухомий, струмопровідний, нескінченної ширини і довжини та має кінцеву товщину d ; котушка збуджується змінним струмом I частотою ω , провідник котушки представляється нескінченно тонким; електрична провідність σ , відносна магнітна проникність μ_r і швидкість руху перетворювача $\vec{v} = (v_x, v_y, 0)$ є сталими. Відповідно до цієї математичної моделі розглядалися три розрахункові області, в яких визначалися комплексні значення магнітної індукції:

- в області $0 < z < z_0$

$$\vec{B}_1 = \vec{B}_i + \vec{B}_r,$$

$$\vec{B}_i = \text{rot } \vec{A}_i, \quad \vec{A}_i = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_l \frac{\vec{J} dl}{R}, \quad (1)$$

$$\Delta \vec{B}_r = 0, \quad \text{rot } \vec{B}_r = 0,$$

де \vec{B}_i описує власне магнітне поле витка довжиною l та густиною струму \vec{J} , а \vec{B}_r – магнітне поле вихрових струмів, наведених в середовищі ОК;

- в області $-d < z < 0$

$$\Delta \vec{B}_2 - \sigma \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \left(v_x \cdot \frac{\partial \vec{B}_2}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial \vec{B}_2}{\partial y} \right) - j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \vec{B}_2 = 0, \quad (2)$$

$$\text{div } \vec{B}_2 = 0;$$

- в області $z < -d$

$$\Delta \vec{B}_3 = 0, \text{rot} \vec{B}_3 = 0. \quad (3)$$

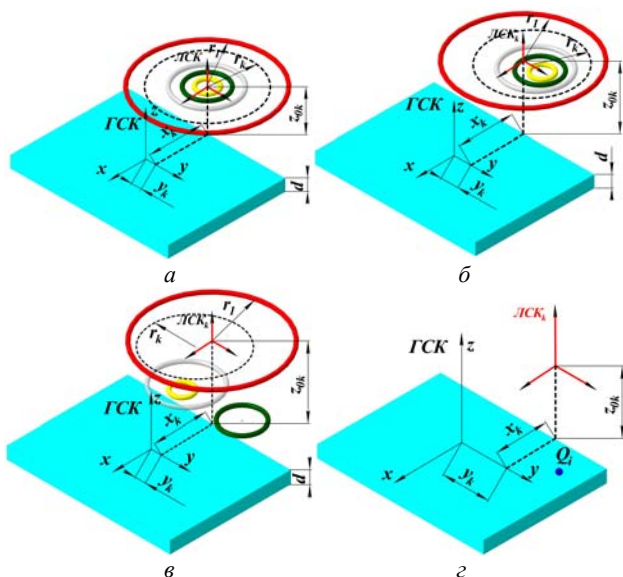


Рис. 2. Геометричні моделі структур збудження НВСП: система концентричних котушок, де котушки розташовані на одній висоті z_0 (а); система котушок, де котушки розташовані на одній висоті z_0 , центри котушок зміщені (б); система котушок, де котушки розташовані на різних висотах, центри котушок зміщені (в); загальне розташування глобальної та локальних систем координат котушок (г)

Розв'язок системи рівнянь (1)-(3) у сукупності з умовами неперервності тангенціальної складової напруженості магнітного поля та нормальної складової магнітної індукції на границях розділу середовищ $z = 0$ та $z = -d$, дозволяє отримати розподіл компонент магнітної індукції в середовищі ОК:

$$B_{2x} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I}{8 \cdot \pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\xi}{\eta \cdot (1 - e^{2 \cdot \gamma \cdot d})} \times$$

$$\times \left[\left\{ -(1 + \lambda_0) \cdot e^{2 \cdot \gamma \cdot d} + \nu_0 \cdot e^{\left(\gamma - \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \right) \cdot d} \right\} \cdot e^{\gamma \cdot z} + \right.$$

$$\left. + \left\{ 1 + \lambda_0 - \nu_0 \cdot e^{\left(\gamma - \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \right) \cdot d} \right\} \cdot e^{-\gamma \cdot z} \right] \times$$

$$\times e^{-z_0 \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot S(\xi, \eta) \cdot e^{-j(x \cdot \xi + y \cdot \eta)} d \xi d \eta \quad (4)$$

$$B_{2y} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I}{8 \cdot \pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(1 - e^{2 \cdot \gamma \cdot d})} \times$$

$$\times \left[\left\{ -(1 + \lambda_0) \cdot e^{2 \cdot \gamma \cdot d} + \nu_0 \cdot e^{\left(\gamma - \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \right) \cdot d} \right\} \cdot e^{\gamma \cdot z} + \right.$$

$$\left. + \left\{ 1 + \lambda_0 - \nu_0 \cdot e^{\left(\gamma - \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \right) \cdot d} \right\} \cdot e^{-\gamma \cdot z} \right] \times$$

$$\times e^{-z_0 \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot S(\xi, \eta) \cdot e^{-j(x \cdot \xi + y \cdot \eta)} d \xi d \eta \quad (5)$$

$$B_{2z} = j \cdot \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I}{8 \cdot \pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\xi^2 + \eta^2}{\eta \cdot \gamma \cdot (1 - e^{2 \cdot \gamma \cdot d})} \times$$

$$\times \left[\left\{ -(1 + \lambda_0) \cdot e^{2 \cdot \gamma \cdot d} + \nu_0 \cdot e^{\left(\gamma - \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \right) \cdot d} \right\} \cdot e^{\gamma \cdot z} - \right.$$

$$\left. - \left\{ 1 + \lambda_0 - \nu_0 \cdot e^{\left(\gamma - \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \right) \cdot d} \right\} \cdot e^{-\gamma \cdot z} \right] \times$$

$$\times e^{-z_0 \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot S(\xi, \eta) \cdot e^{-j(x \cdot \xi + y \cdot \eta)} d \xi d \eta \quad (6)$$

де B_{2x} , B_{2y} , B_{2z} – складові магнітної індукції по просторовим координатам; $S(\xi, \eta)$ – функція форми котушки,

$$S(\xi, \eta) = -j \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \eta}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot J_1 \left(r \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \right);$$

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

$$+ j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r$$

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

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

де v_x , v_y – складові швидкості руху кругового НВСП відносно ОК; d – товщина ОК; ξ , η – змінні інтегрування.

Ці вирази є адекватними у локальній системі координат (ЛСК), де початок координат співпадає з центром витка. Кратні невластні інтеграли першого роду, які вони містять, розраховуються чисельно методом усічення.

Вирази (4)-(6) дозволяють отримати «точну» математичну модель розподілу ГВС в ОК для кругового НВСП. Складові ГВС по просторовим координатах x , y , z відповідно визначаються за формулами:

$$J_x = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \left[\frac{\partial B_{2z}}{\partial y} - \frac{\partial B_{2y}}{\partial z} \right];$$

$$J_y = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \left[\frac{\partial B_{2x}}{\partial z} - \frac{\partial B_{2z}}{\partial x} \right]; \quad (7)$$

$$J_z = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \left[\frac{\partial B_{2y}}{\partial x} - \frac{\partial B_{2x}}{\partial y} \right].$$

Координати контрольних точок Q_i , $i = 1 \dots N$ задаються в глобальній системі координат (ГСК), потім перераховуються в k -ту ЛСК. В ЛСК розрахунок ГВС виконується в кожній контрольній точці, а потім результуючі значення отримуються як суперпозиція в кожній точці $i = 1 \dots N$ від всіх M котушок (рис. 2, в).

В загальному випадку цільова функція для задачі оптимального синтезу в класичній постановці має вигляд:

$$F_{target} = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{k=1}^M J_{ik} - J_{reference} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (8)$$

де $J_{reference}$ – бажане значення густини вихрових струмів в контрольній точці; J_{ik} – густина вихрового струму в контрольній точці ОК з номером i , створена k -ою котушкою системи збудження НВСП; N – кількість контрольних точок в зоні; M – кількість котушок у системі збудження кругового НВСП. В результаті синтезу отримують просторову конфігурацію та геометричні параметри структури збудження НВСП, які в сукупності забезпечують реалізацію необхідних характеристик. Реалізація задачі оптимального синтезу передбачає багатократне вирішення задачі аналізу для кожної поточної структури збудження шляхом чисельних розрахунків. В [14, 15] встановлено, що розрахунки за цими виразами є вельми затратними в сенсі обчислювальних та часових затрат, що унеможливило розв'язок задачі синтезу.

Одним із шляхів вирішення проблеми критичної ресурсоемності є застосування технологій сурогатної оптимізації [16, 17] та стохастичної метаевристичної оптимізації [18, 19]. Тобто для формулювання функції цілі в рамках задачі оптимального синтезу можна використати метамодель НВСП, яка значно простіша в реалізації і менш ресурсоемна [14, 15] та являє собою апроксимацію «точної» електродинамічної моделі.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі: створення програмного забезпечення для розрахунку розподілу ГВС в зоні контролю НВСП із врахуванням ефекту швидкості за «точними» електродинамічними математичними моделями; створення програмного забезпечення для формування точок плану експерименту із використанням ЛП_τ-последовностей Соболя для вибору найбільш досконалих планів експерименту індивідуально для апроксимованих поверхонь відгуку; створити геометричні моделі структур збудження кругових НВСП із однорідною чутливістю для їх оптимального синтезу із урахуванням ефекту швидкості; удосконалити обчислювальну методика побудови метамodelей об'єктів, що характеризуються значною обчислювальною ресурсоемністю при моделюванні фізичних процесів; створити RBF-метамodelі концентричного кругового НВСП нерухомого та з урахуванням ефекту швидкості.

Для розрахунку «точних» електродинамічних математичних modelей (4)-(7) розроблено програмне забезпечення в пакеті MathCAD 15.

Розрахунок розподілу ГВС для витка котушки збудження круглої форми з метою його візуалізації виконувався для випадку варіювання двох параметрів $J = f(x, y)$ (рис. 2,а) та фіксованих інших за формулами (4)-(7) «точної» математичної моделі при наступних вихідних даних: для випадку нерухомого НВСП – $x = 0 \dots 30$ мм, $y = 0 \dots 30$ мм, $r = 5$ мм; для випадку рухомого НВСП – $v = (40; 0; 0)$ м/с; $x = -30 \dots 30$ мм, $y = 0 \dots 30$ мм, $r = 5, 10, 15$ мм; товщина струмопровідного матеріалу $d = 10$ мм; висота розташування витка котушки над ОК $z_0 = 3$ мм; частота $f = 100$ Гц; електрофізичні параметри матеріалу $\sigma = 3,745 \cdot 10^7$ См/м, $\mu_r = 1$, струм $I = 1$ А.

На рис. 3,а-з показано 3D-розподіл ГВС та лінії рівня для деяких радіусів витків котушки збудження. Так, на рис. 3,а,б наведено результати моделювання для нерухомого НВСП, а на рис. 3,в-з – результати розрахунку розподілу ГВС при врахуванні ефекту швидкості.

Обчислювальна складність однократного розрахунку розподілу ГВС за «точною» математичною моделлю при варіюванні тільки двох просторових координат $J = f(x, y)$ при $r = \text{const}$ є достатньо великою і складає від 5 до 8 годин.

Основні положення та розробка метамodelей.

В роботах [14, 17] авторами запропонована загальна обчислювальна методика побудови метамodelей з використанням сучасних досягнень в області штучного інтелекту та теорії планування експериментів. На ряді прикладів доведено ефективність її використання. Для побудови моделі-замісника використовувалися нейронні мережі, які надають можливість швидкого та нескладного розрахунку виходу мережі, навіть при досить великій кількості нейронів у прихованих шарах. В [15, 16] розглянуто деякі особливості застосування цієї технології стосовно задач синтезу НВСП. Надалі увагу при дослідженнях сконцентровано на деталях побудови метамodelей кругових НВСП з певними структурами системи збудження, а саме варіанту, ілюстрованому на рис. 2,а, тобто апроксимації $\hat{J} = f(x, y, r)$.

На відміну від попередніх досліджень авторів, підвищення точності нейромережевого рішення апроксимаційних задач було досягнуто за допомогою комітету нейронних мереж [20]. Комітет приймає кінцеве рішення, використовуючи окремі рішення декількох нейронних мереж, тобто методологію bagging. Таким чином, для зменшення кореляції помилок нейронних мереж застосовується bagging-комітет. Дана методологія передбачає навчання нейронних мереж на bootstrap-вибірках, які являють собою набір елементів із повторами з попередньої навчальної множини даних. Bagging забезпечує найбільшу ефективність у випадку досить великої кількості вихідних навчальних даних. Таким чином, для побудови апроксимаційної моделі застосовувався математичний апарат штучних нейронних мереж, а саме bagging-комітет RBF-мереж з ядерною функцією активації Гауса.

Створення метамodelі передбачає побудову плану комп'ютерного обчислювального експерименту, в точках якого розраховується розподіл ГВС за «точною» математичною моделлю, побудову апроксимаційної моделі та перевірку валідності отриманої моделі.

План експерименту реалізовано за допомогою рівномірного комп'ютерного заповнення точками тривимірного простору пошуку, а саме, з використанням ЛП_τ-последовностей Соболя [21]. Точки плану експерименту згенеровано за допомогою ЛП_τ-последовностей ($\zeta_1, \zeta_2, \zeta_4$) і їх загальна кількість становить: для випадку нерухомого НВСП – $N = 2048$ та $N = 3315$ – для рухомого НВСП. На кожний зріз поверхні по радіусу припадає приблизно $N_{cut} = 146$ та $N_{cut} = 255$ точок відповідно.

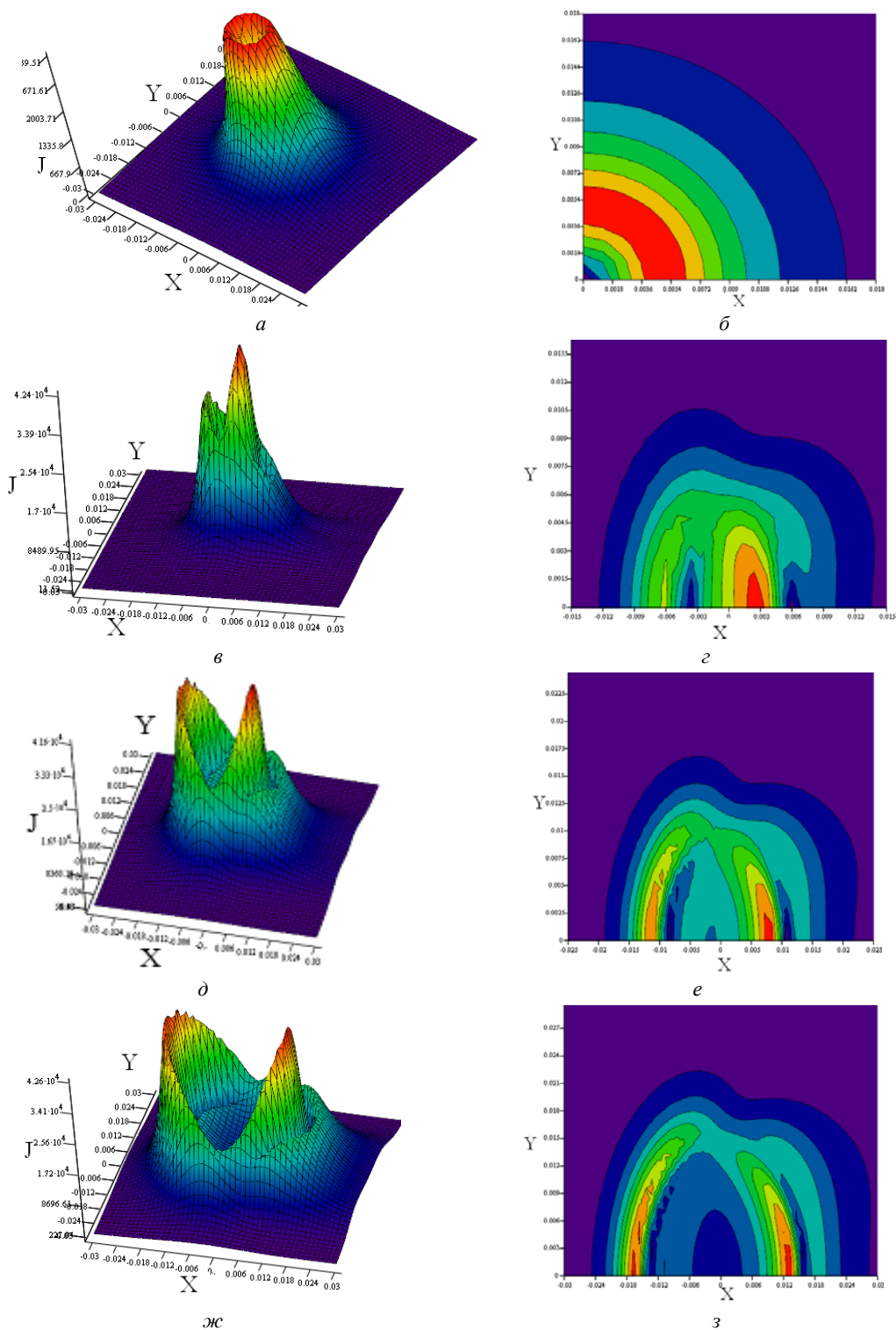


Рис. 3. Точна функція розподілу ГВС на поверхні ОК в зоні контролю 30×30 мм: НВСП нерухомий, котушка збудження $r = 5$ мм (а, б); НВСП рухомий, котушка збудження $r = 5$ мм (в, г); НВСП рухомий, котушка збудження $r = 10$ мм (д, е); НВСП рухомий, котушка збудження $r = 15$ мм (ж, з)

Отримані значення ГВС в точках плану використано як вихідні дані для виконання наступного етапу – побудови метамоделі. Кількість точок розрахунку суттєво залежить від симетрії розподілу ГВС відносно координатних осей (рис. 3), так для нерухомого НВСП точки плану задаються в I квадранті, а для рухомого – в I та II квадрантах.

Наступний рис. 4 наведено з метою наочного уявлення плану експерименту. На рис. 4,а показано

розташування точок ЛП-последностей для малої їх кількості $N = 250$ в тривимірному просторі $k = 3$, а на рис. 4,б – розташування вказаних точок в підпросторах меншої розмірності $k = 2$ для поєднаних факторів (ξ_1, ξ_2, ξ_4) . На рис. 4,в-е представлено тривимірний розподіл точок для фіксованих радіусів 1, 5, 10 та 15 мм при їх генеруванні за цим планом.

Для реалізації другого етапу використовується евристичний спосіб побудови метамоделей за допо-

могою нейронних мереж. Побудова RBF-метамodelей виконана за допомогою автоматичної стратегії та методом багатократних підвбірок.

В автоматичному режимі вибірки формуються випадковим поділом у співвідношенні: 70 % – навчальна, 15 % – контрольна, 15 % – тестова, де тестова сукупність використовувалася для крос-перевірки.

В другій серії побудови метамodelей із застосуванням методу багатократних підвбірок залучався алгоритм bagging, в якому на основі навчальної множини генерувалося 20 вибірок з повторами та виконувалося навчання на основі цих bootstrap-вибірок 20-ти нейронних мереж. Елементи, що не потрапили в чергову вибірку, використовуються в якості тестової

множини для відповідної нейронної мережі. Для нейронних мереж притаманна проблема «перенавчання», яка пов'язана із кількістю нейронів в прихованому шарі. Під час навчання мережі використано техніку регуляризації, що дозволяє уникнути перенавчання нейромережі. Неудалі варіанти мереж, що мають продуктивність менше 90 %, відсіювалися. Всі інші мережі оцінювалися суб'єктивним аналізом гістограм залишків, діаграм розсіювання та чисельними значеннями показників: коефіцієнту детермінації R^2 (продуктивність), відношення стандартних відхилень похибки прогнозу та навчальних даних $S.D.ratio$, середньої відносної величини модельної похибки $MAPE$, залишкового середнього квадрату MS_R .

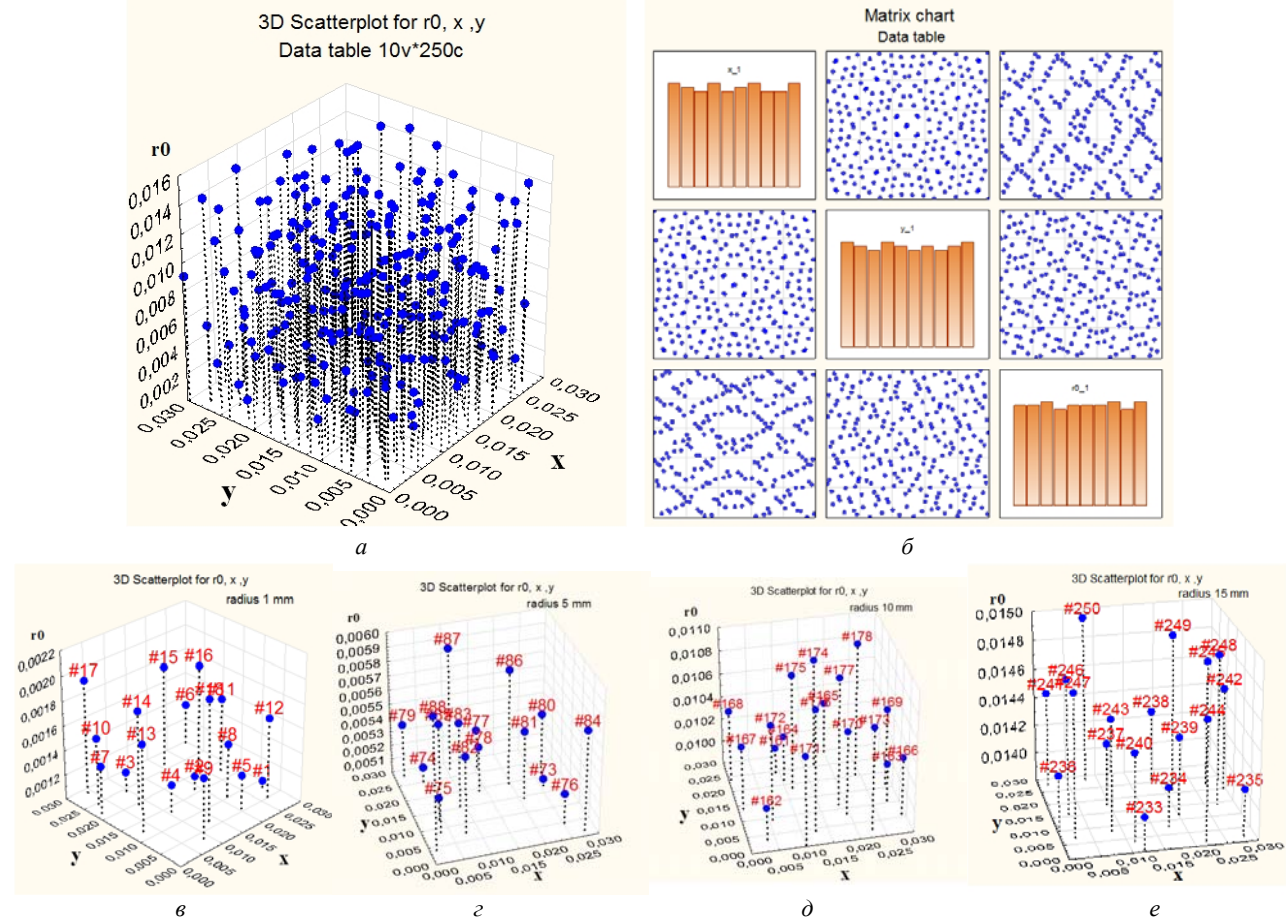


Рис. 4. Розташування точок ЛПт-послідовностей (ξ_1, ξ_2, ξ_3) в тривимірному факторному просторі: для $r = 1 \dots 15$ мм, кількість точок $N = 250$ (а); матричне представлення послідовностей (ξ_1, ξ_2, ξ_3) в двовимірних проєкціях (б); для радіусу витка котушки збудження 1 мм (в); для радіусу 5 мм (г); для радіусу 10 мм (д); для радіусу 15 мм (е)

Для побудови метамodelі нерухомого НВСП при варіюванні трьох параметрів в межах $x = 0 \dots 30$ мм; $y = 0 \dots 30$ мм; $r = 1 \dots 15$ мм створено майже 320 RBF-нейронних мереж для плану $N = 2048$ з кількістю прихованих нейронів від 280 до 350, з яких відібрані найкращі (табл. 1) за вказаними показниками. Мережі із продуктивністю більше 0,9 використовувалися разом, організувавши комітет мереж.

При цьому в якості правила прийняття рішення для підвищення точності застосовується середнє значення мереж, що ввійшли до комітету. Для комітету нейромереж на рис. 5,б,г,е наведено лінії рівня поверхні відгуку в раніше обумовлених діапазонах варіації змінних, що відтворені на 2048 точках навчальної вибірки. На кожній зріз поверхні по радіусу припадає

близько 145 точок. В табл. 2 наведено результати апроксимації розподілу ГВС створеним комітетом для радіусів 5, 10, 15 мм.

Для побудови метамodelі НВСП при врахуванні ефекту швидкості $v = (40; 0; 0)$ м/с та варіюванні трьох параметрів в межах $x = -30 \dots 30$ мм; $y = 0 \dots 24$ мм; $r = 2 \dots 15$ мм створено майже 95 RBF-нейронних мереж для плану $N = 3315$ з кількістю прихованих нейронів від 200 до 700, з яких відібрані найкращі (табл. 3, 4) за вказаними показниками.

Для комітету нейромереж на рис. 6,б,г,е наведено лінії рівня поверхні відгуку, що відтворена на 3315 точках навчальної вибірки. На кожній зріз поверхні по радіусу в цьому плані припадає 255 точок.

Таблиця 1

Кращі RBF-метамоделі нерухомого НВСП					
№ п/п	Нейромережа	R^2 для навчальної, контрольної та тестової вибірок	S.D.ratio	MAPE, %	MS_R
1	RBF-3-282-1(156)	0,9949; 0,9946; 0,993	0,086	22,6	0,00057
2	RBF-3-293-1(218)	0,993; 0,994; 0,994	0,0904	27,9	0,000614
3	RBF-3-293-1(219)	0,994; 0,992; 0,989	0,0939	28,6	0,000674
4	RBF-3-300-1(254)	0,9949; 0,993; 0,989	0,0891	26,8	0,000631
5	RBF-3-322-1(284)	0,995; 0,992; 0,988	0,09	22,9	0,000613
6	RBF-3-343-1(307)	0,996; 0,993; 0,996	0,0739	22,1	0,000424

Таблиця 2

Результати апроксимації розподілу ГВС комітетом мереж для нерухомого НВСП

Радіус, мм	S.D.ratio	MAPE, %	MS_R
5	0,164	13,08	0,000506
10	0,061	5,89	0,000316
15	0,083	6,43	0,000947

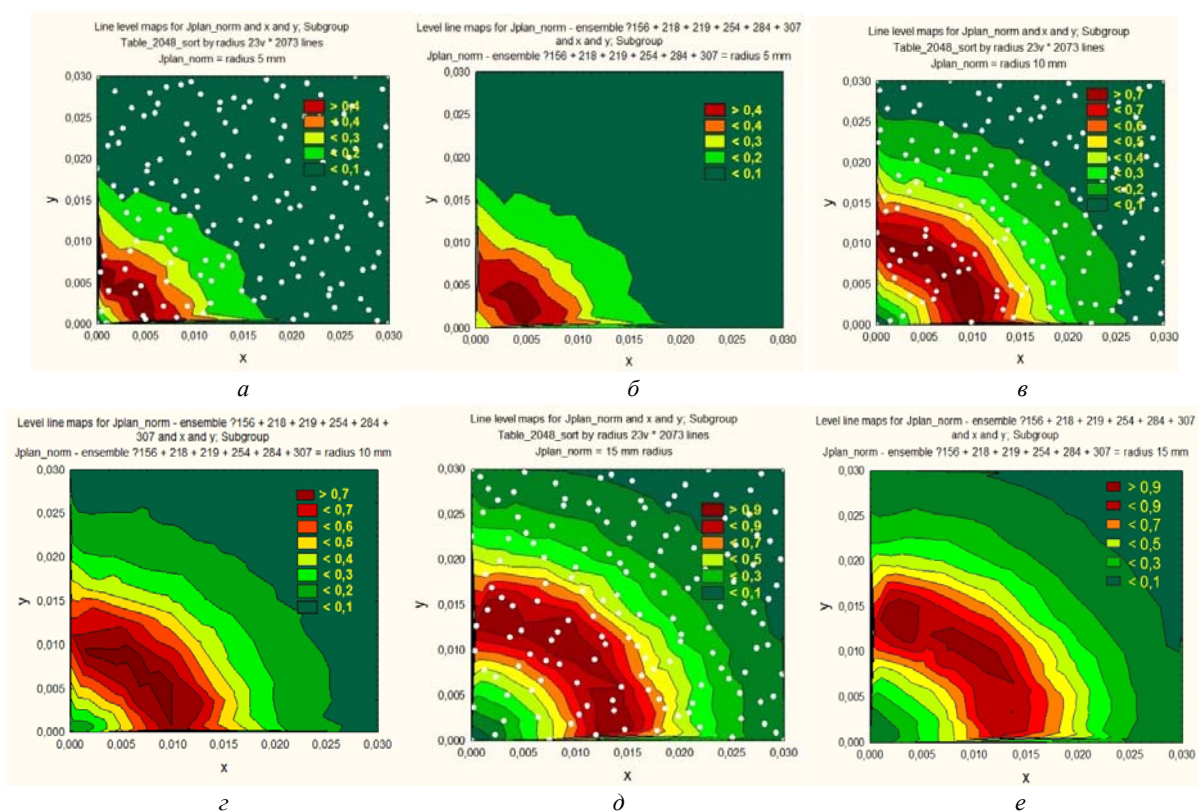


Рис. 5. Лінії рівня поверхні відгуку нерухомого НВСП: план експерименту $N = 145$, нанесений на лінії рівня «точної» моделі, для зрізів поверхні радіусів $r = 5, 10, 15$ мм відповідно (а, в, д); поверхня відгуку, відтворена на точках навчальної вибірки за допомогою комітету мереж (б, з, е)

Таблиця 3

Кращі RBF-метамоделі рухомого НВСП					
№ п/п	Нейромережа	R^2 для навчальної, контрольної та тестової вибірок	S.D.ratio	MAPE, %	MS_R
1	RBF-3-610-1(2)	0,944; 0,933; 0,926	0,278	46	0,00458
2	RBF-3-620-1(8)	0,958; 0,942; 0,935	0,263	41,2	0,00355
3	RBF-3-627-1(15)	0,96; 0,941; 0,918	0,272	44,1	0,00367
4	RBF-3-635-1(28)	0,96; 0,947; 0,933	0,265	37,74	0,00345
5	RBF-3-635-1(29)	0,96; 0,949; 0,924	0,261	38,3	0,00349
6	RBF-3-665-1(31)	0,958; 0,95; 0,938	0,261	39,2	0,00347
7	RBF-3-665-1(34)	0,96; 0,948; 0,937	0,262	32,9	0,00341

Таблиця 4

Результати апроксимації розподілу ГВС комітетом мереж для рухомого НВСП

Радіус, мм	S.D.ratio	MAPE, %	MS_R
5	0,242	31	0,001151
10	0,293	23	0,002382
15	0,381	21,7	0,008434

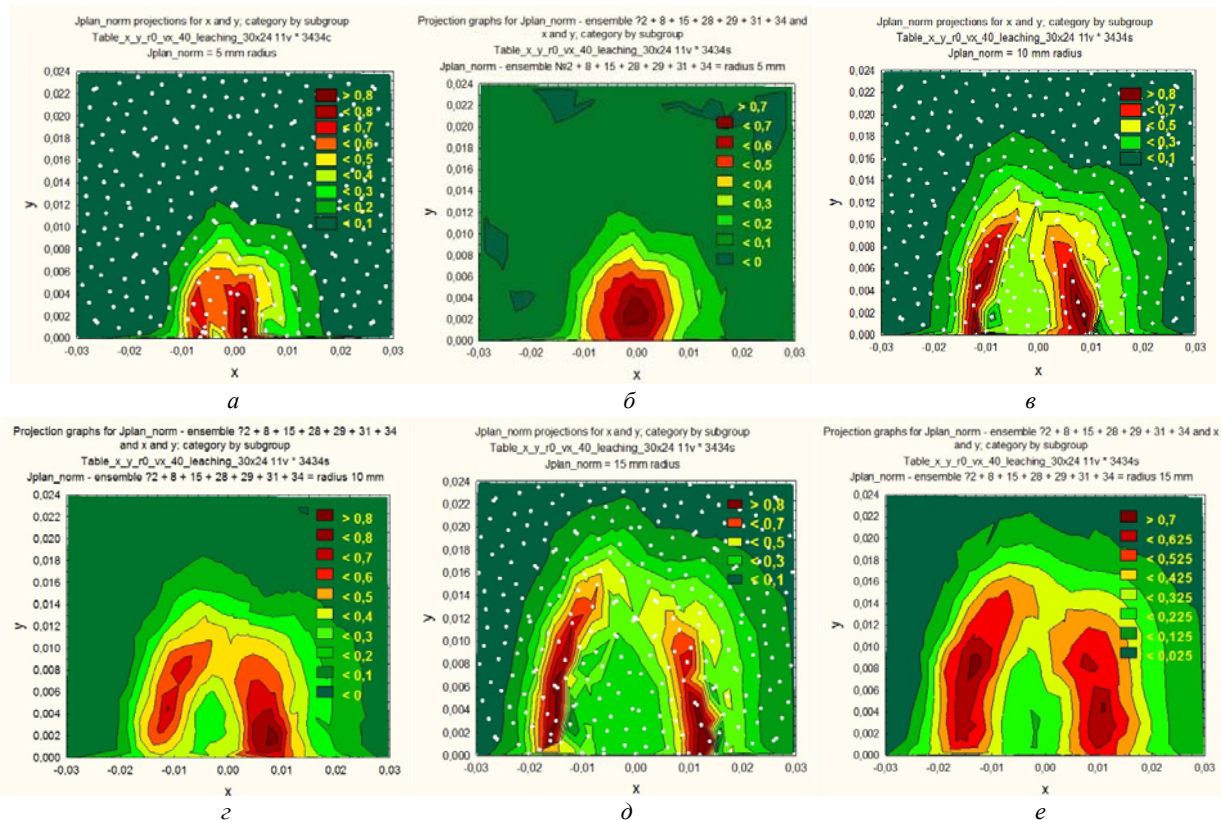


Рис. 6. Лінії рівня поверхні відгуку для рухомого НВСП: план експерименту $N = 255$, нанесений на лінії рівня «точної» моделі, для зрізів поверхні радіусів $r = 5, 10, 15$ мм відповідно (а, в, д); відтворена комітетом мереж на точках навчальної вибірки поверхня відгуку (б, г, е)

Валідація та верифікація метамоделей НВСП.

Одним із критеріїв якості багатofакторної регресійної моделі є перевірка правильності відтворюваності поверхні відгуку за допомогою отриманої математичної моделі у всій області моделювання. На рис. 7 наведено результати відновлення поверхні відгуку для нерухомого НВСП, отриманої за допомогою комітету нейромереж, що виконано у всьому діапазоні варіації змінних на значно збільшеній кількості точок 7154. В даному випадку на зрізи поверхні з радіусами 5, 10, 15 мм припадає по 511 точок.

На етапі відтворення поверхні відгуку адекватність отриманої метамоделі оцінювалася за показниками: сума квадратів відповідно регресії, залишків, загальної; середніх квадратів; дисперсії відтворюваності, адекватності, загальної; стандартної по-

хибки оцінки відтворюваності, оцінки адекватності, загальної; коефіцієнту детермінації; відношення стандартних відхилень; середньої відносної величини модельної похибки (або середньої похибки апроксимації) [22]. Оцінку даних показників зведено в табл. 5.

На рис. 8 наведено результат відновлення поверхні відгуку, отриманої за допомогою комітету нейромереж для рухомого НВСП, що виконано у всьому діапазоні варіації змінних на 6643 точках. На зрізи поверхні радіусів 5, 10, 15 мм в цьому прикладі припадає 511 точок.

Для створеного комітету нейромереж оцінено показники, що характеризують адекватність та інформативність метамоделі, результати яких зведено в табл. 6.

Таблиця 5

Перевірка адекватності та інформативності метамоделі нерухомого НВСП

Компоненти дисперсії ($N = 7154$):	Сума квадратів	Середній квадрат	Дисперсія	Стандартна похибка оцінки
регресії	$SS_D = 369,265$	$MS_D = 123,088$	$\sigma_D^2 = 0,051537$	$S_D = 0,227018$
залишків	$SS_R = 1,91$	$MS_R = 0,000266$	$\sigma_R^2 = 0,000266$	$S_R = 0,016325$
загальної	$SS_T = 374,088$	$MS_T = 0,052221$	$\sigma_T^2 = 0,052210$	$S_T = 0,228496$
критерій Фішера $F_{v_D;v_R}^{experimental} > F_{\alpha;v_D;v_R}^{table value}$	$F_{3;7150}^{experimental} = 193,74; F_{0,05;3;7150}^{table value} = 2,6079$			
коефіцієнт детермінації R^2	0,9945			
середня похибка апроксимації, MAPE, %	$r = 5$ мм	16,56 %		
	$r = 10$ мм	5,92 %		
	$r = 15$ мм	5,41 %		
відношення стандартних відхилень S.D.ratio	0,071445			

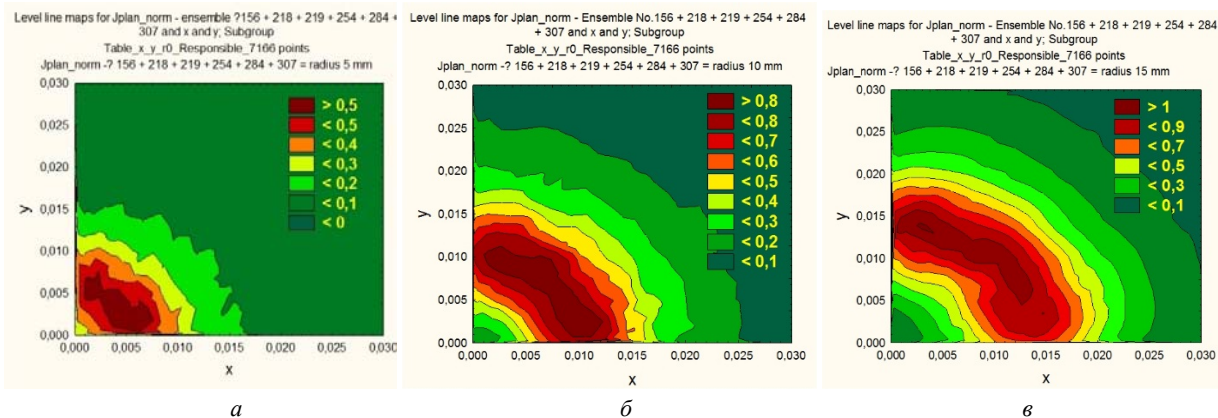


Рис. 7. Відновлення поверхні відгуку за допомогою комітету нейромереж для нерухомого НВСП. Лінії рівня, відтворені на $N = 511$ точках для зрізів поверхні з радіусами 5, 10, 15 мм відповідно (а, б, в)

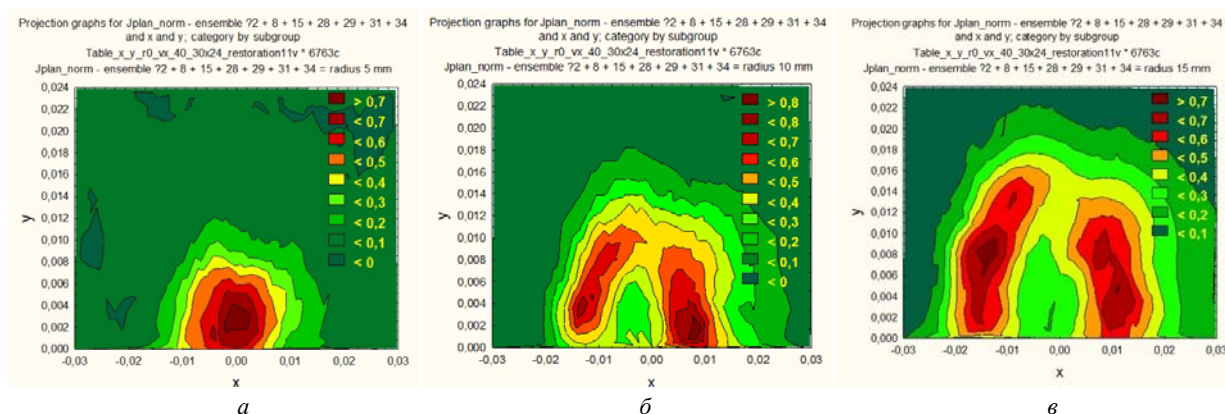


Рис. 8. Відновлення поверхні відгуку за допомогою комітету нейромереж для рухомого НВСП. Лінії рівня, відтворені на $N = 511$ точках для зрізів поверхні радіусів 5, 10, 15 мм відповідно (а, б, в)

Таблиця 6

Перевірка адекватності та інформативності метамоделі рухомого НВСП

Компоненти дисперсії ($N = 6643$)	Сума квадратів	Середній квадрат	Дисперсія	Стандартна похибка оцінки
регресії	$SS_D = 244,1923$	$MS_D = 81,397$	$\sigma_D^2 = 0,036111$	$S_D = 0,190030$
залишків	$SS_R = 27,5733$	$MS_R = 0,004077$	$\sigma_R^2 = 0,004077$	$S_R = 0,06385$
загальної	$SS_T = 278,9221$	$MS_T = 0,041248$	$\sigma_T^2 = 0,041248$	$S_T = 0,203097$
критерій Фішера $F_{V_D;V_R}^{experimental} > F_{\alpha;V_D;V_R}^{table value}$	$F_{3;6639}^{experimental} = 8,857$; $F_{0,05;3;6639}^{table value} = 2,6079$			
коефіцієнт детермінації R^2	0,901353			
середня похибка апроксимації, MAPE, %	$r = 5$ мм	40,38 %		
	$r = 10$ мм	23,54 %		
	$r = 15$ мм	24,79 %		
відношення стандартних відхилень S.D.ratio	0,314381			

Результати дослідження можуть бути використані при синтезі рухомих НВСП із апіорі заданим розподілом ГВС в зоні контролю.

Висновки.

1. Вперше створено RBF–метамоделі концентричного кругового НВСП нерухомого та з урахуванням ефекту швидкості.

2. На основі сучасних комп'ютерних методів планування експерименту, штучного інтелекту та інтелектуального аналізу даних удосконалена обчислювальна методика побудови метамоделей, що характеризуються меншою обчислювальною ресурсоемістю при моделюванні.

3. Вперше запропоновано геометричні моделі структур збудження кругових НВСП із однорідною чутливістю для їх оптимального синтезу із урахуванням ефекту швидкості.

4. Вирішено завдання створення програмного забезпечення для розрахунку розподілу ГВС в зоні контролю НВСП із врахуванням ефекту швидкості за «точними» електродинамічними математичними моделями. Вирішено завдання створення програмного забезпечення для формування точок плану експерименту із використанням ЛПЧ–послідовностей Соболя, що дозволило здійснювати вибір найбільш досконалих планів експерименту індивідуально для апроксимованих поверхонь відгуку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стеблев Ю.И. Синтез заданных характеристик вихретоковых преобразователей // Дефектоскопия. – 1984. – №11. – С. 12-20.
2. Стеблев Ю.И. Синтез вихретоковых преобразователей с заданной структурой возбуждающего поля в зоне контроля // Дефектоскопия. – 1986. – №8. – С. 58-64.
3. Гальченко В.Я., Павлов О.К., Воробийов М.О. Нелінійний синтез магнітних полів збудження вихрострумів перетворювачів дефектоскопів // Методи і прилади контролю якості. – 2002. – №8. – С. 3-5.
4. Gal'chenko V.Ya., Vorob'ev M.A. Structural Synthesis of Attachable Eddy-Current Probes with a Given Distribution of the Probing Field in the Test Zone // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2005. – vol.41. – no.1. – pp. 29-33. doi: **10.1007/s11181-005-0124-7**.
5. Su Z., Ye C., Tamburrino A., Udpa L., Udpa S. Optimization of coil design for eddy current testing of multi-layer structures // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. – 2016. – vol.52. – no.1-2. – pp. 315-322. doi: **10.3233/JAE-162030**.
6. Su Z., Efremov A., Safdarnejad M., Tamburrino A., Udpa L., Udpa S.S. Optimization of coil design for near uniform interrogating field generation // AIP Conference Proceedings. – 2015. – vol.1650. – no.1. – pp. 405-413. doi: **10.1063/1.4914636**.
7. Stawicki K., Gratkowski S. Optimization of Exciter Coils in Eddy Current Transducer for Testing Thick Conducting Plates // International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering; Electromagnetic fields in mechatronics, electrical and electronic engineering: ISEF'05; 2005; Baiona, Spain in studies in applied electromagnetics and mechanics; 27; Oxford, Amsterdam, IOS Press. – 2006. – pp. 497-502.
8. 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: **10.2528/PIERM16011204**.
9. Itaya T., Miki T., Takehira N., Tanaka A., Ishida K. Eddy current distribution for a rectangular coil arranged parallel to a moving conductor slab // IET Science, Measurement & Technology. – 2012. – vol.6. – no.2. – pp. 43-51. doi: **10.1049/iet-smt.2011.0015**.
10. Ishida K., Itaya T., Tanaka A., Takehira N. Magnetic Field Analysis of an Arbitrary Shaped Coil Using Shape Functions // IEEE Transactions on Magnetics. – 2009. – vol.45. – no.1. – pp. 104-112. doi: **10.1109/TMAG.2008.2005119**.
11. Panas S., Kriezis E.E. Eddy current distribution due to a rectangular current frame moving above a conducting slab // Archiv für Elektrotechnik. – 1986. – vol.69. – no.3. – pp. 185-191. doi: **10.1007/BF01574623**.
12. Thollon F., Lebrun B., Burais N., Jayet Y. Numerical and experimental study of eddy current probes in NDT of structures with deep flaws // NDT & E International. – 1995. – vol.28. – no.2. – pp. 97-102. doi: **10.1016/0963-8695(94)00010-h**.
13. Theodoulidis T., Bowler J.R. Interaction of an Eddy-Current Coil With a Right-Angled Conductive Wedge // IEEE Transactions on Magnetics. – 2010. – vol.46. – no.4. – pp. 1034-1042. doi: **10.1109/TMAG.2009.2036724**.
14. Trembovetska R.V., Halchenko V.Ya., Tychkov V.V. The MLP-Metamodels Application In The Surrogate Optimization Tasks // Young Scientist. – 2018. – vol.6. – no.2. – pp. 32-39.
15. Гальченко В. Я., Трёмбовецька Р.В., Тичков В.В. Нейромережева метамодель циліндричного накладного вихрострумів перетворювача як складова сурогатного оптимального синтезу // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2018. – №3(66). – Т.1. – С. 32-38.
16. Гальченко В.Я., Трёмбовецька Р.В., Тичков В.В. Застосування метамодель для вирішення задач синтезу вихрострумів перетворювачів з однорідним розподілом щільності струму в зоні контролю // Збірник тез доповідей XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування»: стан і перспективи, 15-16 травня 2018 р., Київ, ПБФ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – С. 146-147.
17. Halchenko V.Y., Trembovetska R.V., Tychkov V.V. The neurocomputing using of the development metamodels stage in the optimal surrogate antennas synthesis process // Visnyk NTUU KPI Seria – Radiotekhnika Radioaparaturbuduvannia. – 2018. – no.74. – pp. 60-72. doi: **10.20535/radap.2018.74.60-72**.
18. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Tatarchenko M.O., Khomenko V.V. Multicriterion anisotropic regulators synthesis by multimass electromechanical systems // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2014. – no.4. – pp. 105-107.
19. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Voloshko A.V., Bovdyj I.V., Vinichenko E.V., Kobilyanskiy B.B. Single-circuit active screening of magnetic field generated by several overhead transmission lines in residential area // Electrical engineering & electromechanics. – 2018. – no.1. – pp. 41-45. doi: **10.20998/2074-272X.2018.1.06**.
20. Хайкин Саймон. Нейронные сети: полный курс [2-е изд.: пер. с англ.]. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
21. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Дрофа, 2006. – 175 с.
22. Радченко С.Г. Методология регрессионного анализа: монография. – К.: «Корнійчук», 2011. – 376 с.

REFERENCES

1. Stelblev Yu.I. Synthesis of the given characteristics of eddy current converters. *Defectoscopy*, 1984, no.11, pp. 12-20. (Rus).
2. Stelblev Yu.I. Synthesis of eddy current transformers with a given structure of the excitatory field in the control zone. *Defectoscopy*, 1986, no.4, pp. 58-64. (Rus).
3. Halchenko V.Ya., Pavlov O.K., Vorobyov M.O. Nonlinear synthesis of magnetic fields of excitation of eddy-current converters of flaw detectors. *Methods and instruments of quality control*, 2002, no.8, pp. 3-5. (Ukr).
4. Gal'chenko V.Ya., Vorob'ev M.A. Structural Synthesis of Attachable Eddy-Current Probes with a Given Distribution of the Probing Field in the Test Zone. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2005, vol.41, no.1, pp. 29-33. doi: **10.1007/s11181-005-0124-7**.
5. Su Z., Ye C., Tamburrino A., Udpa L., Udpa S. Optimization of coil design for eddy current testing of multi-layer structures. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2016, vol.52, no.1-2, pp. 315-322. doi: **10.3233/JAE-162030**.
6. Su Z., Efremov A., Safdarnejad M., Tamburrino A., Udpa L., Udpa S.S. Optimization of coil design for near uniform interrogating field generation. *AIP Conference Proceedings*, 2015, vol.1650, no.1, pp. 405-413. doi: **10.1063/1.4914636**.
7. Stawicki K., Gratkowski S. Optimization of Exciter Coils in Eddy Current Transducer for Testing Thick Conducting Plates. *International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering; Electromagnetic fields in mechatronics, electrical and electronic engineering: ISEF'05; 2005; Baiona, Spain in studies in applied electromagnetics and mechanics; 27; Oxford, Amsterdam, IOS Press, 2006. pp. 497-502.*
8. 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: **10.2528/PIERM16011204**.
9. Itaya T., Miki T., Takehira N., Tanaka A., Ishida K. Eddy current distribution for a rectangular coil arranged parallel to a moving conductor slab. *IET Science, Measurement & Technology*, 2012, vol.6, no.2, pp. 43-51. doi: **10.1049/iet-smt.2011.0015**.

10. Ishida K., Itaya T., Tanaka A., Takehira N. Magnetic Field Analysis of an Arbitrary Shaped Coil Using Shape Functions. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, vol.45, no.1, pp. 104-112. doi: 10.1109/TMAG.2008.2005119.
11. Panas S., Kriezis E.E. Eddy current distribution due to a rectangular current frame moving above a conducting slab. *Archiv für Elektrotechnik*, 1986, vol.69, no.3, pp. 185-191. doi: 10.1007/BF01574623.
12. Thollon F., Lebrun B., Burais N., Jayet Y. Numerical and experimental study of eddy current probes in NDT of structures with deep flaws. *NDT & E International*, 1995, vol.28, no.2, pp. 97-102. doi: 10.1016/0963-8695(94)00010-h.
13. Theodoulidis T., Bowler J.R. Interaction of an Eddy-Current Coil With a Right-Angled Conductive Wedge. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, vol.46, no.4, pp. 1034-1042. doi: 10.1109/TMAG.2009.2036724.
14. Trembovetska R.V., Halchenko V.Ya., Tychkov V.V. The MLP-Metamodels Application In The Surrogate Optimization Tasks. *Young Scientist*, 2018, vol.6, no.2, pp. 32-39. (Ukr).
15. Halchenko V.Ya., Trembovetska R.V., Tychkov V.V. Neural network metamodel of a cylindrical overhead eddy current converter as a component of surrogate optimal synthesis. *Bulletin of Kherson National Technical University*, 2018, no.3(66), vol.1, pp. 32-38. (Ukr).
16. Galchenko V.Ya., Trembovetska R.V., Tychkov V.V. Application of metamodels for solving problems of synthesis of eddy current converters with a homogeneous distribution of current density in the control zone. *Zbirknik tez dopovidej XVII Mizhnarodnoi naukovo-tehnicnoi konferencii «Priladobuduvannja: stan i perspektivi»* [Materials of the XVII Int. Sci.-Pract. Conf. «Instrumentation: state and prospects»]. Kyiv, NTUU «KPI», 15-16 May, 2018, pp. 146-147. (Ukr).
17. Halchenko V.Y., Trembovetska R.V., Tychkov V.V. The neurocomputing using of the development metamodels stage in the optimal surrogate antennas synthesis process. *Visnyk NTUU KPI Serija – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, 2018, no.74, pp. 60-72. doi: 10.20535/radap.2018.74.60-72.
18. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Tatarchenko M.O., Khomenko V.V. Multicriterion anisotropic regulators synthesis by multimass electromechanical systems. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2014, no.4, pp. 105-107. (Rus).
19. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Voloshko A.V., Bovdyj I.V., Vinichenko E.V., Kobilyanskiy B.B. Single-circuit active screening of magnetic field generated by several overhead transmission lines in residential area. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.1, pp. 41-45. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.06.
20. Haykin Simon. *Neironnye seti: polnyi kurs* [Neural Networks: A Complete Course]. Moscow, Williams Publ. House, 2006. 1104 p. (Rus).
21. Sobol I.M., Statnikov R.B. *Vybor optimal'nyh parametrov v zadachah so mnogimi kriterijami* [Choosing Optimal Parameters in Problems with Many Criteria]. Moscow, Drofa Publ., 2006. 175 p. (Rus).
22. Radchenko S.G. *Metodologija regressionnogo analiza: monografija* [Methodology of regression analysis: monograph]. Kyiv, Korniyuchuk Publ., 2011. 376 p. (Rus).

Надійшла (received) 08.10.2018

Гальченко Володимир Якович¹, д.т.н., проф.,
Трембовецька Руслана Володимирівна¹, к.т.н., доц.,
Тичков Володимир Володимирович¹, к.т.н., доц.,
¹Черкаський державний технологічний університет,
18006, Черкаси, бул. Шевченка, 460,
e-mail: halchvl@gmail.com

V.Ya. Halchenko¹, R.V. Trembovetska¹, V.V. Tychkov¹

¹Cherkasy State Technological University,
460, Shevchenko Blvd., Cherkasy, 18006, Ukraine.

Development of excitation structure RBF-metamodels of moving concentric eddy current probe.

Introduction. The work is devoted to metamodels creation of surface circular concentric eddy current probe. **Formulation of the problem.** In the problem of surface circular concentric eddy current probe synthesis in the general formulation, apriori given desired eddy currents density distribution in the control zone was used. The realization of the optimal synthesis problem involves a multiple solution to the analysis problem for each current structure of numerical calculations excitation, which are very costly in terms of computational and time costs, which makes it impossible to solve the synthesis problem in the classical formulation. By solving the critical resource intensiveness problem, there is the surrogate optimization technology using of that uses the surface circular concentric eddy current probe metamodel, which is much simpler in realization and is an approximation of the exact electrodynamic model. **Goal.** Creation of surface circular concentric eddy current probe RBF-metamodels, which can be used to calculate eddy currents density distribution in the control zone and suitable for use in optimal synthesis problems. **Method.** To develop an approximation model, a mathematical apparatus for artificial neural networks, namely, RBF-networks, has been used, whose accuracy has been increased with the help of the neural networks committee. Correction of errors in the committee was reduced by applying the bagging procedure. During the network training the regularization technique is used, which avoids re-learning the neural network. The computer experiment plan was performed using the Sobol LP τ -sequences. The obtained multivariable regression model quality evaluation was performed by checking the response surface reproducibility correctness in the entire region of variables variation. **Results.** The modelling of eddy currents density distribution calculations on exact electrodynamic mathematical models in the experimental plan points are carried out. For the immovable and moving surface circular concentric eddy current probe, RBF-metamodels were constructed with varying spatial coordinates and radius. **Scientific novelty.** Software was developed for eddy currents density distribution calculation in the surface circular concentric eddy current probe control zone taking into account the speed effect on exact electrodynamic mathematical models and for forming experiment plan points using the Sobol LP τ -sequences. The geometric surface circular concentric eddy current probe excitation structures models with homogeneous sensitivity for their optimal synthesis taking into account the speed effect are proposed. Improved computing technology for constructing metamodels. The RBF-metamodels of the surface circular concentric eddy current probe are built and based on the speed effect. **Practical significance.** The work results can be used in the surface circular concentric eddy current probe synthesis with an apriori given eddy currents density distribution in the control zone. References 22, tables 6, figures 8.

Key words: surface eddy current probe; eddy currents density distribution; excitation structure; mathematical model; optimal synthesis; computer experiment plan; LP τ -sequence; RBF-metamodel; neural networks committee.