

Міністерство освіти і науки України
Черкаський державний технологічний університет

ТРЕМБОВЕЦЬКА РУСЛАНА ВОЛОДИМИРІВНА



УДК 004.67:620.179.147

**ТЕОРІЯ ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗУ НАКЛАДНИХ
ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНИХ
СИСТЕМ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ**

Спеціальність 05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Черкаси – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Черкаському державному технологічному університеті Міністерства освіти і науки України на кафедрі приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Гальченко Володимир Якович,
Черкаський державний технологічний університет,
м. Черкаси, професор кафедри приладобудування,
мехатроніки та комп'ютеризованих технологій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кошовий Микола Дмитрович,
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є.
Жуковського "Харківський авіаційний інститут",
м. Харків, професор кафедри інтелектуальних
вимірювальних систем та інженерії якості

доктор технічних наук, професор
Ситніков Валерій Степанович,
Одеський національний політехнічний університет,
м. Одеса, завідувач кафедри комп'ютерних систем

доктор технічних наук, професор
Мірошник Марина Анатоліївна,
Український державний університет залізничного
транспорту, м. Харків, професор кафедри
спеціалізованих комп'ютерних систем

Захист відбудеться " 06 " травня 2021 р. о 12.00 год. на засіданні спеціалізованої вченої Д 73.052.04 у Черкаському державному технологічному університеті за адресою: 18006, м. Черкаси, бул. Шевченка, 460.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Черкаського державного технологічного університету за адресою: 18006, м. Черкаси, бул. Шевченка, 460.

Автореферат розісланий " 26 " березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Ю.Ю. Бондаренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В сучасних умовах розвитку промисловості в галузі важкого машинобудування, підприємств чорної металургії, де широко використовується неперервне лиття заготовок, холодний та гарячий прокат металопродукції, досить гострою є проблема контролю якості продукції засобами автоматизованого неруйнівного контролю в «потоці», коли об'єкт переміщується з певною швидкістю. Значні успіхи в забезпеченні необхідного рівня якості продукції останнім часом досягнуто використанням комп'ютерних систем неруйнівного контролю, зокрема електромагнітного з застосуванням накладних вихрострумів перетворювачів (ВСП). Сучасні вимоги до систем неруйнівного контролю потребують не тільки виявлення різноманітних дефектів, зокрема дефектів порушень суцільності та структури матеріалів й виробів, але також встановлення їх форми, допустимих розмірів, прийнятності структурних відхилень, що є значно складнішою проблемою та є неможливим без застосування цифрових технологій. Ефективне виконання ідентифікації дефектів значно скорочує перебраковку як матеріалів на підготовчому етапі виробництва, так і вже готових виробів при визначенні їх придатності до експлуатації або в її процесі, що суттєво впливає на кінцеві матеріальні затрати виробництва. Ідентифікація дефектів є неможливою без перетворювачів із досконалими характеристиками, спотворений через неоднакову чутливість до дефекту сигнал яких вже не можна виправити навіть надсучасними засобами вторинної обробки, в тому числі й цифрової. В останні роки спостерігається певна інтенсифікація зусиль дослідників в напрямку проектування вдосконалених конструкцій ВСП, що обумовлена розвитком сучасної обчислювальної техніки, новими можливостями застосування більш досконалого математичного апарату та програмного забезпечення. Дана проблематика досліджувалася вітчизняними та іноземними науковцями, серед яких відзначимо насамперед роботи Стеблева Ю.І., Яковенка В.В., Гальченка В.Я., Repelianto A.S., Su Z., Ye C., Tamburrino A., Koyama K., Hoshikawa H., Postolache O., Ribeiro A.L., Ramos H.G., Udpa L., Udpa S., Safdarnejad M., Stawicki K., Gratkowski S. тощо. Їх зусилля було направлено на створення методів оптимального синтезу систем збудження ВСП, які генерують рівномірний розподіл густини вихрових струмів (ГВС) в об'єктах контролю (ОК). Такий розподіл забезпечує однорідну чутливість до дефектів суцільності та локальної структури. Але в усіх цих дослідженнях розглядалися статичні ОК, ефект швидкості, наявність якого властива для рухомих об'єктів та суттєво впливає на розподіл ГВС в них, не враховувався. З цієї причини теоретичні здобутки попередників не можуть бути використано для оптимального синтезу рухомих ВСП, що забезпечують однорідний розподіл ГВС вздовж всього тіла дефекту.

Наразі спостерігається наявна **суперечність** між необхідністю створення однорідного розподілу ГВС в зоні контролю об'єкта, що призводить до однорідної чутливості перетворювачів до дефектів, та між використанням класичних систем збудження ВСП, яким притаманний неоднорідний розподіл ГВС.

Тому актуальною є **науково-прикладна проблема** створення теорії оптимального параметричного синтезу всього класу рухомих вихрострумів перетворювачів з однорідною чутливістю в зоні контролю для забезпечення необхідних умов щодо ідентифікації дефектів порушень суцільності матеріалів й виробів при використанні комп'ютерних систем неруйнівного контролю.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету в період 2020-2021 р.р. у межах ініціативної науково-дослідної роботи за темою: «Обернені задачі вихрострумowego контролю: моделі, алгоритми, методи оптимізації», номер держреєстрації №0120U103875, у виконанні якої здобувачка брала безпосередню участь як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є створення теорії сурогатного оптимального параметричного синтезу всього класу рухомих накладних вихрострумowych перетворювачів з однорідною чутливістю до дефектів порушень суцільності матеріалів й виробів щодо забезпечення необхідних умов їх ідентифікації комп'ютерними системами неруйнівного контролю.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно виконати такі науково-технічні завдання:

- 1) Створити єдину методологію сурогатного оптимального синтезу всього класу рухомих вихрострумowych перетворювачів із однорідною чутливістю в зоні контролю;
- 2) Створити багатовимірні нейромережеві метамоделі кругових рухомих накладних вихрострумowych перетворювачів з планарною та об'ємною структурами систем збудження;
- 3) Створити багатовимірну нейромережеву метамоделю рамкового рухомого накладного вихрострумowego перетворювача з планарною структурою системи збудження;
- 4) Створити багатовимірну нейромережеву метамоделю рамкового рухомого тангенціального накладного вихрострумowego перетворювача з об'ємною структурою системи збудження;
- 5) Створити методи оптимального синтезу кругових рухомих накладних вихрострумowych перетворювачів із однорідною чутливістю в зоні контролю з планарною та об'ємною структурами систем збудження;
- 6) Створити метод оптимального синтезу рамкових рухомих накладних вихрострумowych перетворювачів із однорідною чутливістю в зоні контролю з планарною структурою системи збудження;
- 7) Створити метод оптимального синтезу рамкових рухомих тангенціальних накладних вихрострумowych перетворювачів із однорідною чутливістю в зоні контролю з об'ємною структурою системи збудження.

Об'єкт дослідження – процеси неруйнівного вихрострумowego контролю струмопровідних матеріалів та виробів.

Предмет дослідження – метамоделі та методи сурогатного оптимального параметричного синтезу накладних вихрострумowych перетворювачів із однорідною чутливістю в зоні контролю для комп'ютерних систем неруйнівного контролю.

Методи досліджень. Для розв'язку поставлених задач було використано сучасний математичний апарат, зокрема теорія електромагнітного поля, теорія диференціальних та інтегральних рівнянь, нейронні мережі, теорія статистики, теорія планування експерименту, теорія обернених задач, теорія оптимізації.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. *вперше* розроблена методологія сурогатного оптимального синтезу всього класу рухомих вихрострумowych перетворювачів із однорідною чутливістю в зоні

контролю, що включає також створені метод генерування багатовимірних однорідних комп'ютерних планів експериментів з гарантовано низькими показниками розбіжностей на основі комбінацій квазівипадкових R_d -послідовностей; адитивний комітетний нейромережевий метод побудови багатовимірних метамоделей вихрострумів перетворювачів. Методологія дозволяє створити нові методи оптимального сурогатного синтезу рухомих накладних вихрострумів перетворювачів різних типів, для яких є властивий однорідний розподіл густини вихрових струмів, згенерований в об'єкті контролю.

2. *вперше* створено багатовимірні нейромережеві метамоделі кругових рухомих накладних вихрострумів перетворювачів з планарною та об'ємною структурами систем збудження, які є моделями на «точну» електродинамічну модель та дозволяють внаслідок значно меншої обчислювальної ресурсомісткості здійснювати процедуру оптимального сурогатного синтезу перетворювачів, що реалізують апріорі заданий розподіл густини вихрових струмів в об'єкті.

3. *вперше* побудовано багатовимірну нейромережеву метамоделю рамкового рухомого накладного вихрострумів перетворювача з планарною структурою системи збудження, конструкція якого надає більші можливості щодо збільшення зони контролю з однорідним розподілом густини вихрових струмів. Як модель-замісник метамоделю дозволяє здійснювати швидкі обчислення розподілу густини вихрових струмів близькі за точністю до «точної» електродинамічної моделі;

4. *вперше* створено багатовимірну нейромережеву метамоделю рамкового рухомого тангенціального накладного вихрострумів перетворювача з об'ємною структурою системи збудження, який є ефективним для ідентифікації дефектів типу розшарувань комп'ютерними системами електромагнітного неруйнівного контролю. Метамоделю характеризується високою обчислювальною продуктивністю в порівнянні із «точною» електродинамічною моделлю, що дозволяє реалізувати процедуру оптимального синтезу;

5. *вперше* створено методи оптимального синтезу кругових рухомих накладних вихрострумів перетворювачів з планарною та об'ємною структурами систем збудження, які забезпечують однорідну чутливість, що є необхідною умовою для розпізнавання дефектів суцільності в комп'ютерних системах контролю якості виробів;

6. *вперше* створено метод синтезу рамкових рухомих накладних вихрострумів перетворювачів з планарною структурою систем збудження, який дозволяє реалізувати однорідну чутливість перетворювачів в зоні контролю;

7. *вперше* створено метод синтезу рамкових рухомих тангенціальних накладних вихрострумів перетворювачів з об'ємною структурою систем збудження, використання якого дозволяє розширити зону з рівномірним розподілом густини вихрових струмів, що обумовлює однорідну чутливість перетворювачів до дефектів.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність результатів досліджень полягає в наступному:

1. Розширена науково-технічна база проектування рухомих вихрострумів перетворювачів для комп'ютерних систем неруйнівного контролю завдяки створеній єдиній методології сурогатного оптимального синтезу.

2. Розроблені програмні засоби, які реалізують побудову багатовимірних однорідних комп'ютерних планів експериментів на основі квазівипадкових R_d -послідовностей, що дозволило отримати плани експериментів з гарантовано низькими показниками центрованої та циклічної розбіжностей. Створена програма захищена свідоцтвом №102018 України про реєстрацію авторського права на твір «Комп'ютерна програма «Програма створення багатовимірного комп'ютерного однорідного плану експерименту на основі R_d -послідовностей»».

3. Створені алгоритми та програмно реалізовано розрахунки розподілу густини вихрових струмів в об'єкті контролю за «точними» електродинамічними моделями для накладних вихрострумів перетворювачів кругових та рамкових різновидів із врахуванням ефекту швидкості.

4. Створено алгоритм побудови комітетних нейромережових метамоделей рухомих накладних вихрострумів перетворювачів з високою часовою обчислювальною продуктивністю, що дозволяє реалізувати сурогатний оптимальний синтез цих перетворювачів. Розроблені програмні засоби апроксимації багатовимірних поверхонь відгуку з прийнятною похибкою. Розроблено практичні підходи для перевірки адекватності та інформативності створених метамоделей, що ґрунтуються на перевірці статистичних гіпотез.

5. Розроблені алгоритми та програмні засоби, які реалізують методи умовної оптимізації багатовимірних нелінійних цільових функцій, що дозволяє проектувати накладні вихрострумові перетворювачі із однорідною чутливістю до дефектів. Чисельним моделюванням на низці прикладів доведена ефективність розроблених засобів.

Результати проведених досліджень знайшли практичне впровадження у навчальний процес на кафедрі приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету та кафедрі виробництва приладів НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Також отримані результати досліджень впроваджено у промисловості в АТ «Укрзалізниця», виробничий підрозділ служби сигналізації та зв'язку «Шевченківська дистанція сигналізації та зв'язку», філії «Науково-виробничого центру технічної діагностики «Техдіагаз» Черкаська діагностична дільниця АТ «Укртрансгаз».

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні здобутки та результати моделювання отримано здобувачем самостійно. Наукові положення, що винесено на захист, та висновки дисертаційної роботи належать автору.

У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачем здійснено аналіз науково-технічної інформації в галузі вихрострумів контролю щодо використання електромагнітних полів збудження з апріорі заданими властивостями. Запропонована класифікація перетворювачів за ознаками особливостей генерування електромагнітного поля збудження [11]; здійснено аналіз сучасних досліджень в сфері математичного моделювання з використанням евристичних методів побудови метамоделей для ресурсомістких задач [14, 15, 33, 34, 36]; проведено огляд та аналіз математичних методів, що використовуються для розв'язку некоректно поставлених обернених нелінійних задач [16, 39, 41, 47, 49, 52, 53]; створено комп'ютерний план експерименту на основі ЛП_T-послідовностей та розроблено програмне забезпечення [1, 2, 5, 12, 26, 27, 44]; створено багатовимірні комп'ютерні плани однорідної генерації точок в гіперпаралелепіпеді з використанням безпараметричних адитивних

рекурсивних R_d -послідовностей та комбінацій ЛП $_t$ -послідовностей Соболя [13, 42, 43, 50]; побудовано RBF-метамоделі вихрострумових перетворювачів різноманітних систем збудження [1, 3, 5, 10, 17, 18, 22-25, 28-29, 32, 55, 56]; здійснена оцінка адекватності та інформативності метамodelей [3, 9, 20, 40]; виконано розрахунок розподілу ГВС з урахуванням ефекту швидкості [4, 31]; запропонована гібридна побудова нейромережевої метамodelі НВСП [6, 9, 35]; реалізовано сурогатний параметричний синтез НВСП із різними типами систем збудження [6, 7, 8, 17, 18, 37, 38, 45, 46, 48, 51, 54, 57]; апробовано різновиди цільових функцій для розв'язку задачі оптимального синтезу [7, 30]; розраховано похибки оптимального синтезу перетворювачів [8]; побудовано метамodelь на основі MLP-нейронної мережі [19, 20]. В творі "Комп'ютерна програма" [21], зазначеному в свідоцтві про реєстрацію авторського права, автору належить розробка програми розрахунку мовою програмування MathCAD. Особистий внесок здобувача у наукових роботах, написаних у співавторстві, зазначений у списку праць, опублікованих за темою дисертації.

Апробація результатів дисертаційного дослідження. Основні положення дисертаційної роботи викладено та обговорено на таких наукових конференціях та семінарах: Всеукраїнська конференція «Теоретико-практичні проблеми використання математичних методів і комп'ютерно-орієнтованих технологій в освіті та науці» (Київ, 2018 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні тенденції розвитку науки» (Ужгород, 2018 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (Київ, 2018 р.); International Scientific-Practical Conferences «Information Technologies in Education, Science and Technology» (Cherkasy, 2018, 2020 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (Одеса, 2018 р.); Міжнародні науково-технічні конференції «Датчики, прилади та системи» (Черкаси–Херсон–Лазурне, 2018, 2019 р.); Міжнародна конференція «Проблеми інформатики та моделювання» (Харків–Одеса, 2018 р.); International Conferences «NDT Days» (Bulgaria Sozopol, 2018-2020 р.); Всеукраїнські науково-практичні інтернет-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно-небезпечних об'єктах» (Харків, 2018, 2019 р.); Scientific conference with international participation «Non-Destructive Testing in Context of the Associated Membership of Ukraine in the European Union» (Poland, Lublin, 2018 р.); Міжнародний науковий симпозіум «Інтелектуальні рішення». Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи) (Ужгород, 2019 р.); Науково-практичні конференції «Інформатика, математика, автоматика» (Суми, 2019, 2020 р.); Науково-практичні конференції «Фізика, електроніка, електротехніка» (Суми, 2019, 2020 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Обробка сигналів і негаусівських процесів» (Черкаси, 2019 р.); Науково-технічна конференція з міжнародною участю «Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському Союзі» (Київ, 2019 р.); International scientific conferences «Mathematical modeling» - Thematic fields: Theoretical foundations and specificity of mathematical modelling. Mathematical modelling of technological processes and systems, (Bulgaria, Borovets, 2019, 2020 р.); Міжнародна конференція «Контроль і управління в складних системах», (Вінниця, 2020 р.); Міжнародна науково-практична on-line конференція «Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві» (Кропивницький, 2020 р.).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано в **57** наукових роботах, у тому числі: в **21-й** науковій праці (з них **8** проіндексовано у наукометричних базах даних Scopus та Web of Science; **5** – опубліковані у періодичних закордонних рецензованих виданнях; **5** – у вітчизняних фахових наукових журналах; **2** – у вітчизняних наукових журналах, проіндексованих у міжнародних наукометричних базах та **1** свідоцтві про реєстрацію авторського права на твір - комп'ютерну програму), а також у **36** матеріалах конференцій та тезах доповідей.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з анотації, змісту, вступу, шести розділів, висновків і додатків. Загальний обсяг роботи становить 325 сторінки, з них обсяг основного тексту – 265 сторінок, 109 рисунків, 24 таблиць, список використаних джерел складає 159 найменувань і займає 24,5 сторінок, а також 6 додатків на 59 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито суть та стан наукової проблеми, обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання щодо досліджень, розкрито наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, наведено дані про публікації та апробацію роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз науково-прикладної проблеми, вивчено сучасний стан розвитку комп'ютерних систем неруйнівного електромагнітного контролю плаского металопрокату, слябів, отриманих в результаті роботи машин безперервного лиття заготовок на підприємствах чорної металургії. В процесі виробництва металовиробів можливим є виникнення поверхневих та підповерхневих дефектів сталеплавильного й прокатного походження, які мають фіксуватися системою контролю та аналізуватися з огляду на їх критичність. На основі аналізу узагальненої структурної схеми комп'ютерних систем неруйнівного електромагнітного контролю визначено, що їх невід'ємним компонентом, від якого значною мірою залежить ефективність роботи систем в цілому стосовно виявлення та ідентифікації дефектів суцільності виробів і матеріалів, є ВСП, зокрема накладні.

Перехід від розв'язку задач дефектоскопії щодо виявлення порушень суцільності матеріалу до задач дефектометрії, що вимагають встановлення їх геометричних параметрів та форми, багато в чому залежить від здатності ВСП генерувати сигнал, який несе повною мірою інформацію про дефекти. Формування сигналу ВСП відбувається внаслідок огинання вихровими струмами, які наведено в ОК системою збудження (СЗ) перетворювача, тіла дефекту. В результаті складного перерозподілу шляхів протікання вихрових струмів, обумовлених геометрією дефекту та ОК, його електрофізичними параметрами, створюється власне електромагнітне поле вихрових струмів, що й виконує функції носія інформації. Для виконання необхідних умов щодо формування повноінформаційного сигналу ВСП розподіл ГВС вздовж тіла дефекту має бути рівномірним, що забезпечує однорідну чутливість до дефекту.

З огляду на це в розділі проведено систематизацію та критичний аналіз, відомих з науково-технічних джерел інформації, певних ідей, підходів та методів до створення СЗ ВСП, які реалізують однорідний розподіл ГВС в зоні контролю об'єкта. В результаті встановлено, що дослідниками розглянуто випадки контролю, коли взаємного переміщення перетворювачів та ОК не було або швидкість такого переміщення була незначною та дозволяла нехтувати нею, тобто увага була

зосереджена на нерухомих ОК. Отже, для створення СЗ, для яких властивий однорідний розподіл ГВС, можна було обмежитись оптимальним синтезом джерел електромагнітного поля з відповідним розподілом напруженості поля збудження. Для статичних ОК це автоматично гарантує отримання однорідного розподілу ГВС в об'єкті. Але для значної частки металовиробів контроль здійснюють автоматично в «потоці», коли нехтувати ефектом швидкості при вихрострумовому контролі не є прийнятним. Це можна пояснити наведенням додаткових вихрових струмів, що обумовлені наявністю струмів перенесення. Тому зроблено висновок про необхідність створення теорії оптимального синтезу рухомих ВСП з однорідною чутливістю до дефектів, що є можливим в результаті виконання умов щодо однорідності саме для розподілу ГВС в зоні контролю об'єкта, а не для розподілу напруженості електромагнітного поля в зоні, як у випадку статичних ВСП.

При апріорі заданому бажаному розподілі ГВС в якості вихідних даних, отримання технічних параметрів СЗ ВСП, що його реалізує, є можливим шляхом розв'язку нелінійної оберненої електродинамічної задачі. Тому в розділі проведено також огляд відомих математичних методів розв'язку некоректно поставлених задач цього типу. В результаті аналізу встановлено, що серед сучасних підходів перспективним є оптимізаційний метод. Наразі відомим є широкий спектр стохастичних метаевристичних алгоритмів глобальної оптимізації, які ефективно використовують для пошуку екстремумів цільових функцій з урахуванням систем обмежень на змінні. Відзначено генетичні алгоритми, алгоритми імітації відпалу, оптимізації роєм часток тощо. Всі вони добре пристосовані для розв'язку багатовимірних оптимізаційних задач з яровими цільовими функціями, що є характерним для обернених задач. Особливо відмічені гібридні алгоритми, що поєднують переваги декількох алгоритмів з погляду на їх пошукову здатність та швидку збіжність до розв'язку.

Також зазначено, що розрахунки розподілу ГВС є вельми ресурсомісткими, що потребують значних обчислювальних затрат навіть при використанні функціональних залежностей, отриманих шляхом аналітичного розв'язку задач теорії поля на основі рівнянь Максвелла. При застосуванні для цієї мети чисельних методів ситуація ще складніша. Звернена увага на неможливість виконання процедур класичної оптимізації внаслідок неприпустимо великих затрат обчислювального часу. Тому запропоновано використання технологій сурогатної оптимізації, коли замість «точної», але складної для обчислень та ресурсомісткої, електродинамічної моделі СЗ для побудови цільової функції застосовують значно менш ресурсомістку модель-замісник, тобто метамодель. В розділі проведено огляд методів створення метамodelей, які розрізняють використаним для їх побудови математичним апаратом. Розглянуто їх переваги та недоліки з погляду на придатність для апроксимації гіперповерхонь відгуку, яким притаманна суттєва нелінійність та нерегулярність поведінки. Зроблено висновок щодо доцільності створення багатовимірних метамodelей, що описують розподіл ГВС в зоні контролю об'єкта, з використанням нейромереж як універсальних апроксиматорів, здатних забезпечити прийнятну точність.

Окрім того, в розділі на основі проведеного аналізу сформульована мета дисертаційного дослідження, поставлено низку завдань, виконання яких забезпечує її досягнення.

У **другому розділі** виконано концептуальну постановку науково-технічної проблеми, яка полягає в наступному. Область V_1 асоціюють з ОК, який є струмопровідним, однорідним, ізотропним середовищем. ОК є нескінченної ширини, довжини та має кінцеву товщину d . Його швидкість $\vec{v} = (v_x, v_y, 0)$ переміщення є сталою відносно

ВСП. ОК має електрофізичні параметри σ та μ_r . Область V_2 – немагнітне, непровідне середовище із магнітною проникністю вакууму μ_0 , тобто це повітряний простір, в якому розміщується ВСП. Область V_3 асоціюють з трансформаторним ВСП, який в свою чергу включає до складу СЗ та вимірнювальну котушку (ВК).

СЗ є джерелом електромагнітного поля із заданим змінним струмом збудження I круговою частотою ω та густиною струму \vec{J}_{cm} . Вона може бути утворена витками зі струмом довільної форми. Частіше за все застосовують витки кругової та прямокутної форми, тобто рамкові СЗ. На практиці реальні джерела збудження характеризують

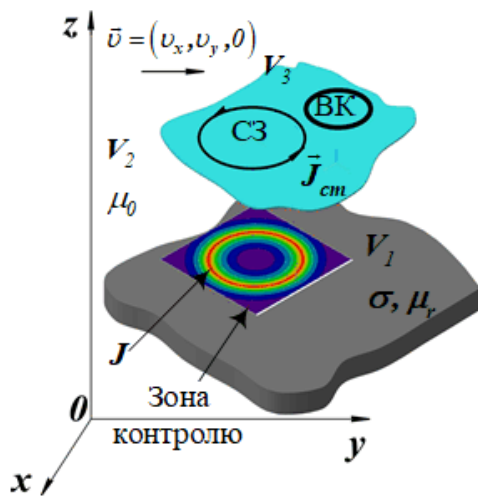


Рис. 1. Постановка проблеми синтезу НВСП

перетином обмоток кінцевих розмірів. Електромагнітне поле збудження вважаємо квазістаціонарним. ВК ВСП розташована над зоною контролю в безпосередній близькості до ОК та може бути використана для реєстрації значень ЕРС, що індукована результуючим електромагнітним полем, створеним в результаті взаємодії поля збудження та інформаційного поля вихрових струмів J . Необхідним є створення наперед заданого однорідного розподілу ГВС в зоні контролю об'єкта. Класичні конструкції СЗ НВСП не дозволяють реалізувати бажаний розподіл ГВС навіть для статичних ОК. Тому головна ідея досліджень полягає в побудові СЗ рухомих перетворювачів, які представляють сукупність декількох окремих секцій котушки, включених послідовно-узгоджено або послідовно-зустрічно «за полем» та розмішених у просторі або в одній площині (планарна структура СЗ), або на різних висотах над ОК (об'ємна структура) чи в гібридному змішаному варіанті (гібридна структура), що здатні забезпечити такий розподіл ГВС. Необхідно створити теоретичні засади єдиної методології та на її основі низки методів, які дозволяють знайти МРС секцій котушки СЗ, напрямки їхньої намотки, кількість секцій та геометричні параметри, координати розташування у просторі.

В розділі побудована методологія сурогатного оптимального синтезу всього класу рухомих ВСП із однорідною чутливістю в зоні контролю, що складена з сукупності методів, а саме методу створення «точної» електродинамічної моделі взаємодії СЗ ВСП з ОК; створеного методу генерування багатовимірних однорідних комп'ютерних планів експериментів з гарантовано низькими показниками розбіжностей на основі комбінацій квазівипадкових R_d -послідовностей; створеного адитивного комітетного нейромережевого методу побудови багатовимірних метамоделей СЗ ВСП; методів пошуку глобальних екстремумів цільової функції засобами умовної стохастичної метаевристичної оптимізації; методу остаточної оцінки похибки синтезу бажаного розподілу ГВС за «точною» електродинамічною моделлю.

Як приклад, наведено узагальнену для кругових та рамкових СЗ «точну» електродинамічну модель ВСП, що отримана аналітично в результаті розв'язку системи диференціальних рівнянь в частинних похідних в декартовій системі координат методом інтегральних перетворювань Фур'є з врахуванням умов щодо неперервності тангенціальних складових напруженості поля і нормальних складових магнітної індукції на границях середовищ, підстановка в яку відповідних функцій форми для різновидів витків збудження дозволяє визначити вирази для складових ГВС за просторовими координатами:

$$J_x = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \left[\frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} \right]; \quad J_y = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \left[\frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x} \right]; \quad J_z = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \left[\frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right], \quad (1)$$

де

$$B_x = \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})} \cdot \left[\left\{ -(1 + \lambda_0) \cdot e^{2 \cdot \gamma \cdot d} + \nu_0 \cdot e^{(\gamma - \sqrt{\xi^2 + \eta^2}) \cdot d} \right\} \cdot e^{\gamma \cdot z} + \right. \\ \left. + \left\{ 1 + \lambda_0 - \nu_0 \cdot e^{(\gamma - \sqrt{\xi^2 + \eta^2}) \cdot d} \right\} \cdot e^{-\gamma \cdot z} \right] \cdot 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, \\ B_y = \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})} \cdot \left[\left\{ -(1 + \lambda_0) \cdot e^{2 \cdot \gamma \cdot d} + \nu_0 \cdot e^{(\gamma - \sqrt{\xi^2 + \eta^2}) \cdot d} \right\} \cdot e^{\gamma \cdot z} + \right. \\ \left. + \left\{ 1 + \lambda_0 - \nu_0 \cdot e^{(\gamma - \sqrt{\xi^2 + \eta^2}) \cdot d} \right\} \cdot e^{-\gamma \cdot z} \right] \cdot 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, \\ B_z = 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})} \cdot \left[\left\{ -(1 + \lambda_0) \cdot e^{2 \cdot \gamma \cdot d} + \nu_0 \cdot e^{(\gamma - \sqrt{\xi^2 + \eta^2}) \cdot d} \right\} \cdot e^{\gamma \cdot z} - \right. \\ \left. - \left\{ 1 + \lambda_0 - \nu_0 \cdot e^{(\gamma - \sqrt{\xi^2 + \eta^2}) \cdot d} \right\} \cdot e^{-\gamma \cdot z} \right] \cdot 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, \\ \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}}; \quad \nu_0 = \frac{4 \cdot \mu_r \cdot \gamma \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \cdot e^{(\sqrt{\xi^2 + \eta^2} - \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}}; \\ \gamma = \sqrt{\xi^2 + \eta^2} - j \cdot \sigma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot (\nu_x \cdot \xi + \nu_y \cdot \eta) + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r; \quad S(\xi, \eta) - \text{функція форми витка; } \xi, \eta - \text{змінні інтегрування.}$$

«Точна» електродинамічна модель ВСП в загальному вигляді може бути представлена сукупністю будь-яких математичних виразів, що є характерними для різноманітних типів ВСП, отриманих в тому числі і в результаті чисельних методів розрахунків. Тобто вона може бути будь-якої складності та повинна адекватно відображати процеси взаємодії СЗ ВСП із ОК.

Також суттєва увага у розділі приділена створеному методу генерування багатовимірних однорідних комп'ютерних планів експериментів (КПЕ). Цей метод є одним зі значущих для побудови метамodelей або сурогатних modelей. КПЕ є специфікацією точок в одиничному гіперкубі, тобто є семплінгом точок, стратегія вибору яких забезпечує виявлення глобальних та локальних трендів топології багатовимірної поверхні відгуку. Рівномірність розподілу збільшує ймовірність

потрапляння хоча би деяких з точок в області екстремумів чи перегинів гіперповерхні відгуку. З цих причин математичний опис багатовимірної поверхні відгуку є найбільш строгим, ніж якби зондування було проведено в точках, розташованих якимось іншим чином. Важливо також забезпечити компроміс між обмеженою кількістю використовуваних точок плану і кількістю інформації, яку можна отримати з допомогою ретельно відібраних точок. Показано, що при генеруванні однорідних КПЕ, навіть з використанням комбінацій найбільш досконалих із усіх відомих квазівипадкових ЛП_τ-послідовностей Соболя, виникають проблеми щодо їх гомогенності. Приклади невдалих варіантів планів експериментів навіть вже для двовимірних випадків ілюстровано на рис. 2.

Зі збільшенням розмірності s КПЕ візуальна оцінка їх гомогенності стає неможливою. Тому для її виконання використано кількісні числові показники центрованої та циклічної розбіжностей, що застосовано для вимірювання відхилення розподілу сформованої послідовності точок від ідеального рівномірного розподілу, тобто в якості функції міри неоднорідності.

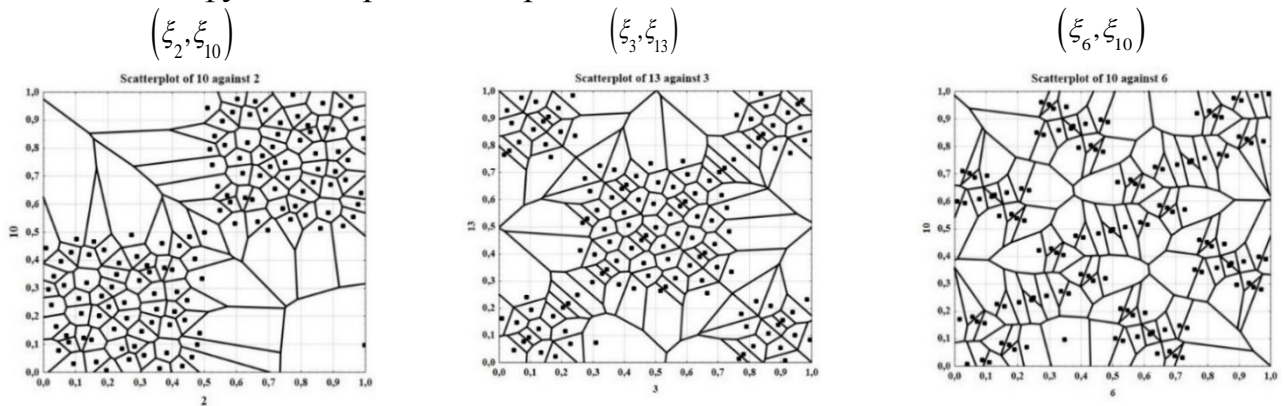


Рис. 2. Візуалізація невдалих двовимірних планів однорідних експериментів на основі ЛП_τ-послідовностей Соболя з використанням діаграм Вороного

Вказано, що ці різновиди розбіжностей відносно L_2 -норми є інваріантними щодо перемаркування й упорядкування факторів плану і відносно обертання координат та можуть бути обчислені відповідно за наступними виразами:

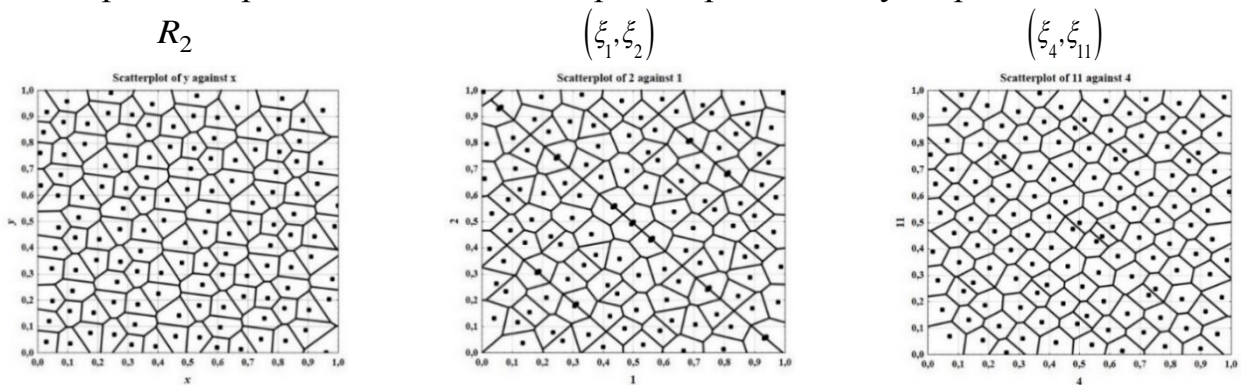
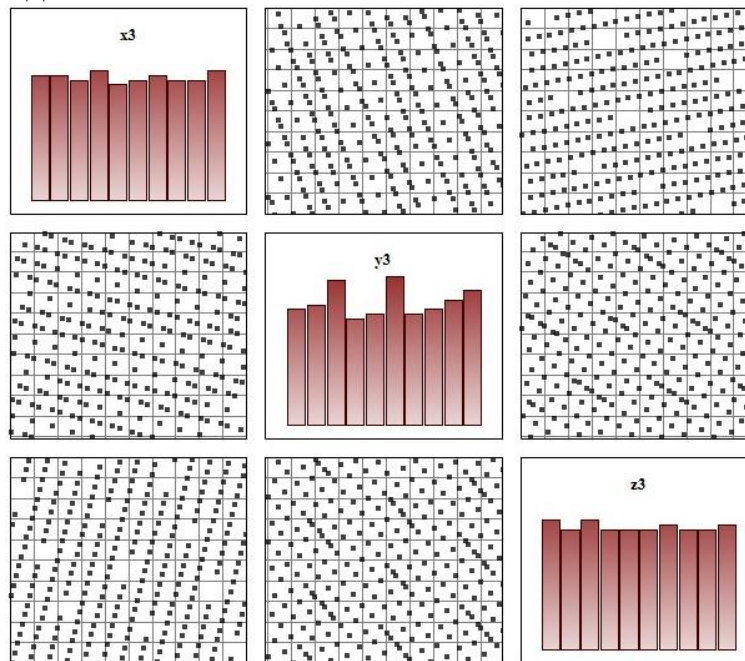
$$\begin{aligned} (CD(D_n))^2 &= \left(\frac{13}{12}\right)^s - \frac{2}{N} \cdot \sum_{k=1}^N \prod_{j=1}^s \left[1 + \frac{1}{2} \cdot |x_{kj} - 0.5| - \frac{1}{2} \cdot |x_{kj} - 0.5|^2 \right] + \\ &+ \frac{1}{N^2} \cdot \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N \prod_{i=1}^s \left[1 + \frac{1}{2} \cdot |x_{ki} - 0.5| + \frac{1}{2} \cdot |x_{ji} - 0.5| - \frac{1}{2} \cdot |x_{ki} - x_{ji}| \right] \\ (WD(P))^2 &= \left(\frac{4}{3}\right)^s + \frac{1}{N^2} \cdot \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N \prod_{i=1}^s \left[\frac{3}{2} - |x_{ki} - x_{ji}| \cdot \left(1 - |x_{ki} - x_{ji}| \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

Розроблено метод побудови багатовимірних однорідних КПЕ на основі квазівипадкових рекурсивних R_d -послідовностей, що дозволило отримати плани експериментів з не кращими в порівнянні з планами на ЛП_τ-послідовностях, але гарантовано низькими показниками центрованої та циклічної розбіжностей, які можуть бути згенеровані автоматично без додаткових досліджень. На рис. 3 приведено плани двовимірних експериментів з високими показниками гомогенності, створені на ЛП_τ- та R_d -послідовностях. Деякі числові значення показників розбіжностей для двовимірних планів наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Показники розбіжностей для деяких двовимірних КПЕ

Показники	Квазіпослідовності						
	R_2	ЛП $_{\tau}$					
		(ξ_1, ξ_2)	(ξ_1, ξ_7)	(ξ_4, ξ_{11})	(ξ_2, ξ_{10})	(ξ_3, ξ_{13})	(ξ_2, ξ_{20})
Центрована розбіжність $\times 10^{-4}$	5.261	0.7805	0.9471	0.6876	65.55	4.588	7.141
Циклічна розбіжність	3.555938	3.555628	3.555688	3.555708	3.557398	3.557328	3.556283

На чисельних експериментах доведено адекватність та придатність метода для створення однорідних КПЕ довільної розмірності. При цьому тенденцію високої гомогенності розподілу багатовимірних КПЕ також можна спостерігати, що проілюстровано проєкціями точок для тривимірного плану на рис. 4.

Рис. 3. Приклади двовимірних планів однорідних експериментів на основі ЛП $_{\tau}$ - та R_d -послідовностей з високими показниками гомогенностіРис. 4. Матричне представлення R_3 -послідовностей в двовимірних проєкціях

Деякі числові значення показників розбіжностей для п'ятивимірних планів наведено в табл. 2. Для порівняння показано плани на R_5 - та ЛП $_{\tau}$ - послідовностях. Зазначено, що перехід розтягненням від одиничного гіперкубу до гіперпаралелепіеду реального факторного простору не складає особливих труднощів та не вносить суттєвих змін в якість характеристик розподілу. В точках КПЕ, отриманого таким

шляхом, підлягає обчисленню за «точними» електродинамічними моделями (1) масив значень модуля ГВС у визначеній зоні контролю об'єкта, який надалі використовуємо як навчальну вибірку для створення багатовимірної метамоделі. Для генерування КПЕ та оцінки їх гомогенності створено спеціальне програмне забезпечення мовою програмування MathCAD.

Таблиця 2. Показники розбіжностей для деяких п'ятивимірних КПЕ

Показники	Квазіпослідовності					
	R ₅	ЛП _τ				
		$\begin{pmatrix} \xi_1, \xi_2, \\ \xi_3, \xi_5, \xi_7 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \xi_1, \xi_2, \\ \xi_3, \xi_5, \xi_6 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \xi_1, \xi_2, \\ \xi_5, \xi_7, \xi_{10} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \xi_1, \xi_2, \\ \xi_{10}, \xi_{19}, \xi_{16} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \xi_2, \xi_6, \\ \xi_{20}, \xi_{10}, \xi_{16} \end{pmatrix}$
Центрована розбіжність $\times 10^{-3}$	1.959	0.973	0.946	9.391	11.113	12.357
Циклічна розбіжність	8.431419	8.430584	8.430845	8.435925	8.44094	8.446635

Крім того, в розділі представлено створений адитивний комітетний нейромережевий метод побудови багатовимірних метамоделей ВСП. Метод побудовано в рамках евристичної парадигми створення метамоделей, а саме з застосуванням регресійних RBF-нейронних мереж на радіально-базисних функціях. В якості функції активації нейронів прихованого шару використано функцію Гауса. Вказано, що цей вибір пояснений універсальними апроксимаційними властивостями нейронних мереж (НМ) та відсутністю вимог щодо попереднього «точного, жорсткого» задання вигляду моделі. Теоретичною основою і обґрунтуванням того, що НМ здатна апроксимувати будь-яку функціональну залежність є теорема Колмогорова-Арнольда. Це є причиною широкого застосування НМ при створенні метамоделей у складних випадках топології гіперповерхні відгуку. Відзначено, що до переваг нейронних RBF-мереж відносять те, що вони мають лише один прихований шар нейронів, який істотно спрощує характерну для більш складних НМ задачу вибору кількості прихованих шарів і робить цей вибір визначеним. Також ці мережі можуть бути швидко навчені, що обумовлено можливістю застосування добре вивчених методів лінійної оптимізації при підборі параметрів лінійної комбінації у вихідному шарі мережі. В розділі акцентовано увагу на істотні складнощі побудови глобальної НМ-метамоделі з прийнятною точністю апроксимації гіперповерхні відгуку у випадках її суттєвої просторової неоднорідності, нелінійності та нерегулярності поведінки. Тому запропоновано застосування гібридного підходу, що полягає в одночасному використанні декомпозиції області дизайну на декілька підобластей, де здійснюють розв'язок задач локальної апроксимації, з наступною «зшивкою» складових частин апроксимацій в єдину неперервну модель, та множинних НМ, побудованих на техніках асоціативних машин із різними методами отримання рішення. Поєднання при формуванні вихідного сигналу здійснюють за допомогою лінійної комбінації вихідних сигналів окремих НМ, зокрема усередненням за ансамблем. Крім того, передбачено, що НМ працюють на основі методу підсилення шляхом бустінгу та беггінгу. Це дозволяє вносити випадкові зміни до масиву навчальної вибірки, що необхідні з метою подальшого створення декількох альтернативних моделей, які засновані на різних підмножинах даних.

Також вказано, що важливим атрибутом створеного методу є використання адитивного принципу побудови регресійної метамоделі. Ідея адитивної НМ-регресії полягає в багаторівневому прямому східчастому моделюванні: побудові регресійної

моделі першого рівня; розрахунку похибки апроксимації гіперповерхні, отриманої на навчальній множині; мінімізації залишків за допомогою НМ-метамоделі другого рівня, для чого початкові цільові значення замінюють відповідними залишками перед навчанням другої моделі; повторення процесу доти, поки не буде досягнуто необхідної точності НМ-регресійної моделі остаточного рівня; створення кінцевої НМ-метамоделі шляхом додавання вкладів від декількох НМ-регресійних моделей всіх рівнів. Поєднання всіх цих обчислювальних технологій дозволило створити метод, два різновиди якого схематично продемонстровано на рис. 5.

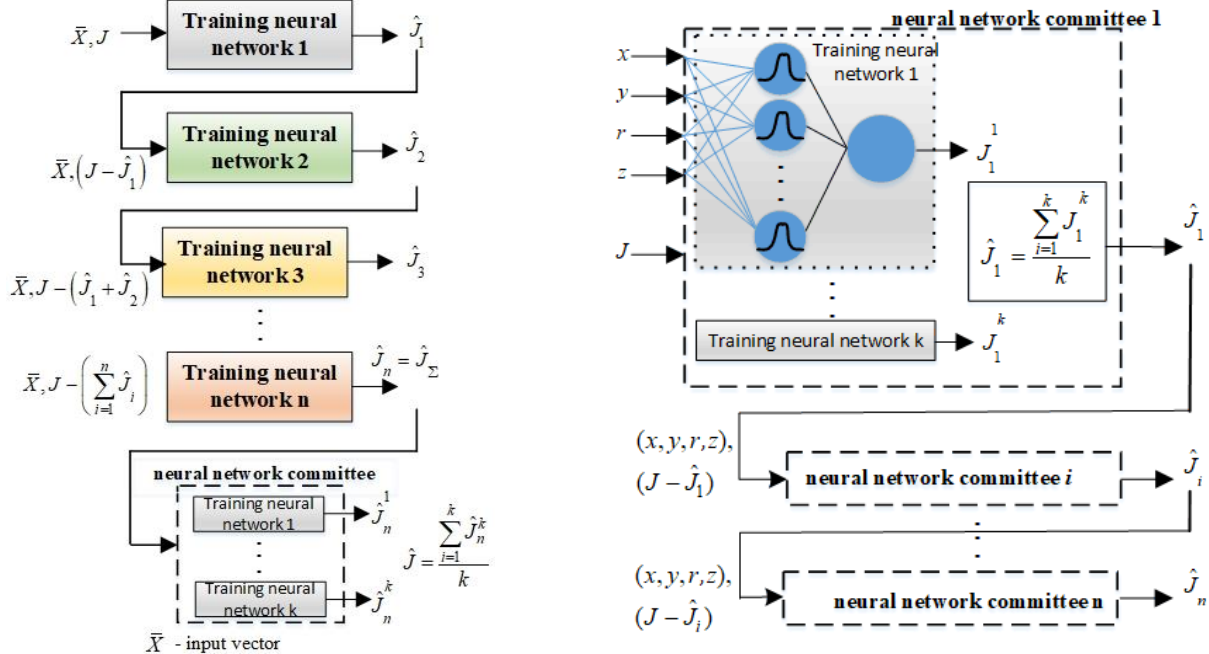


Рис. 5. Схеми побудови адитивної регресійної нейромережевої метамоделі

Відбір окремих найпродуктивніших НМ в комітеті виконано за об’єктивними та суб’єктивними показниками, які фіксують в процесі їх побудови, а саме коефіцієнту детермінації для навчальної, контрольної та тестової вибірок; відношенню стандартних відхилень *S.D.ratio*; середньої відносної величини модельної похибки *MAPE, %.*, суми квадратів залишків *SS_R*, середнього квадрата залишків *MS_R*, а також діаграм розсіювання та гістограм залишків.

В розділі також показано підходи остаточної оцінки адекватності й інформативності отриманих метамodelей за сукупністю статистичних показників, які містить табл. 3.

Таблиця 3. Показники для оцінки адекватності та інформативності метамodelей ВСП

Компонент дисперсії	Сума квадратів	Число степенів свободи	Середній квадрат	Дисперсія	Стандартна похибка оцінки	Критерій
регресія	$SS_D = \sum_{i=1}^N (\hat{J}_i - \bar{J})^2$	$\nu_D = n$	$MS_D = \frac{SS_D}{\nu_D}$ Середній квадрат регресії	$\sigma^2_D = \frac{SS_D}{N-1}$	$s_D = \sqrt{\sigma^2_D}$	$F_{\nu_D; \nu_R}^{ecn} = \frac{MS_D}{MS_R}$
залишки	$SS_R = \sum_{i=1}^N (J_i - \hat{J}_i)^2$ Залишкова сума квадратів (або похибок)	$\nu_R = N - n - 1$	$MS_R = \frac{SS_R}{N - n - 1}$ Залишковий середній квадрат похибок	$\sigma^2_R = \frac{SS_R}{N - n - 1}$ Дисперсія залишків (дисперсія адекватності)	$s_R = \sqrt{\sigma^2_R}$	
загальна	$SS_T = \sum_{i=1}^N (J_i - \bar{J})^2$	$\nu_T = N - 1$	$MS_T = \frac{SS_T}{\nu_T}$	$\sigma^2_T = \frac{SS_T}{N - 1}$	$s_T = \sqrt{\sigma^2_T}$	

Також в цьому розділі наведено можливі варіанти функцій апроксимації багатовимірних поверхонь відгуку для низки різновидів структур СЗ ВСП, які зведено в табл.4. Розроблено відповідні програмні засоби чисельної реалізації метамоделей мовою програмування MathCAD.

Таблиця 4. Варіанти функцій апроксимації багатовимірних поверхонь відгуку для низки різновидів структур СЗ ВСП

Різновид структури СЗ		
Кругова планарна	Кругова об'ємна	Кругова гібридна
$\hat{J} = f(x, y, r)$	$\hat{J} = f(x, y, r, z_0)$	$\hat{J} = f(x, y, r, z_0)$
Рамкова планарна	Рамкова об'ємна	Рамкова гібридна
$\hat{J} = f(x, y, a, b)$	$\hat{J} = f(x, y, a, b, z_0)$	$\hat{J} = f(x, y, a, b, z_0)$
Рамкова тангенціальна планарна	Рамкова тангенціальна об'ємна	Рамкова тангенціальна гібридна
$\hat{J} = f(x, y, a, b)$	$\hat{J} = f(x, y, a, b, x_0, z_0)$	$\hat{J} = f(x, y, a, b, x_0, z_0)$

В цьому розділі відзначена важлива роль, яку відіграють при оптимальному параметричному синтезі СЗ ВСП оптимізаційні методи пошуку глобального екстремуму. Враховуючи практично відсутню апріорну допоміжну інформацію щодо топології гіперповерхні відгуку, в якості алгоритмів пошуку оптимуму обрано стохастичні метаевристичні їх різновиди. Вони є досить потужними засобами розв'язку оптимізаційних задач у випадках багатовимірності, багатоекстремальності, наявності обмежень на змінні, недиференційовності, багатовимірного ярового виду цільових функцій. Саме це зумовило використання в дослідженнях групи алгоритмів, які дозволяють відшукувати субоптимальні, тобто досяжно близькі до точних, розв'язки задачі.

Зазначено, що з цією метою було застосовано еволюційний меметичний гібридний генетичний алгоритм з локальним пошуком екстремуму симплексним методом Нелдера-Міда; біонічний поведінковий алгоритм оптимізації роєм часток зі стратегією випадкової топології зв'язків, який заснований на моделюванні колективної поведінки самоорганізованих систем, що складений з елементів, які взаємодіють; низькорівневий гібридний алгоритм оптимізації роєм часток із еволюційним формуванням складу рою, який об'єднує високу пошукову здатність до знаходження глобального екстремуму, що властива генетичним алгоритмам, з ефективністю його визначення в умовах ярового характеру цільової функції, яка є відмінною особливістю ройових алгоритмів. Всім цим алгоритмам притаманна значна швидкість збіжності в умовах високої розмірності простору пошуку.

Зазначено також види цільових функцій, які було використано при синтезі в якості критеріїв оптимізації. Це квадратичний критерій, мінімакський критерій та середньостепенева апроксимація мінімаксного критерію, якому притаманна гладкість. Обмеження на розміри зони контролю та геометричні параметри секційних котушок СЗ ВСП у вигляді двосторонніх нерівностей враховано шляхом заміни змінних та зведенням задачі умовної оптимізації до безумовної з наступним поверненням до початкових змінних. Створено програми реалізації методів оптимізації мовою програмування MathCAD.

На завершення в розділі розглянуто метод оцінки похибки сурогатного оптимального синтезу однорідного розподілу ГВС за «точною» електродинамічною моделлю, що реалізовано порівняльним аналізом синтезованого розподілу з апріорі заданим бажаним.

Третій розділ присвячено створенню методів оптимального сурогатного синтезу кругових рухомих НВСП з планарною та об'ємною структурами СЗ, які забезпечують однорідну чутливість до дефектів, що є необхідною умовою для розпізнавання дефектів суцільності в комп'ютерних системах контролю якості виробів. Ці методи розроблено в рамках єдиної методології оптимального синтезу всього класу рухомих ВСП, яку запропоновано в розділі 2. Відповідно до зазначеної методології для створення багатовимірних НМ-метамоделей кругового рухомого НВСП з планарною та об'ємною структурами СЗ використана «точна» електродинамічна модель (1), що враховує кругову форму СЗ:

$$S(\xi, \eta) = -j \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot \eta}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot J_1\left(a \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}\right) \quad (3)$$

Гомогенна об'ємна СЗ представлена сукупністю послідовно з'єднаних секційних

катушок з внутрішнім та зовнішнім радіусами r_1 і r_2 й прямокутним перетином, ширину та висоту якого визначають лінійними розмірами a , b . При цьому планарну кругову структуру СЗ НВСП можна вважати окремим випадком об'ємної. Геометрична модель рухомого НВСП з круговою структурою СЗ наведена на рис. 6.

Математична модель (1) отримана при припущенні щодо нескінченно тонкого перетину витка СЗ, тобто його спрощеного представлення у вигляді δ -функції. Такий прийом дозволив суттєво спростити отримання аналітичного розв'язку крайової задачі. Але в реальності це спрощення є досить «жорстким» та виникає необхідність врахування перетину секційної катушки СЗ, що можна зробити додатковим інтегруванням за прямокутним поперечним перетином, геометричні параметри якого відображено на рис. 7. Якщо вважати густину струму збудження за всім перетином секційної катушки сталою, тоді в формулах (1) вираз $e^{-z_0 \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot S(\xi, \eta)$ необхідно замінити наступним:

$$\frac{w}{a \cdot b} \cdot \int_{-a/2}^{a/2} -j \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot (r_m + p) \cdot \eta}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot J_1\left((r_m + p) \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}\right) dp \times$$

$$\times \left[\frac{e^{z_m \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}}}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot \left(e^{-\left(\frac{b}{2} \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}\right)} - e^{\left(\frac{b}{2} \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}\right)} \right) \right] = \frac{w}{a \cdot b} \cdot I_s(r_m, a) \cdot I_E(z_m, b)$$
(4)

де J_1 – функція Бесселя 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 катушки відповідно.

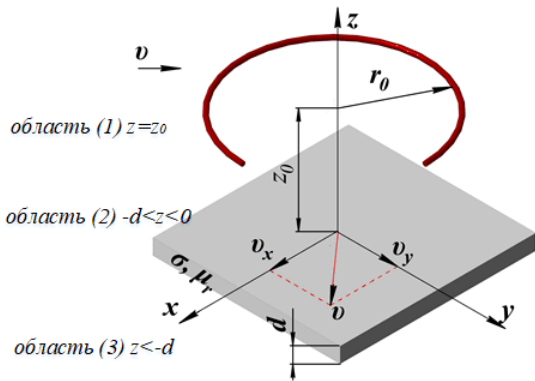


Рис. 6. Геометрична модель рухомого НВСП кругової структури СЗ

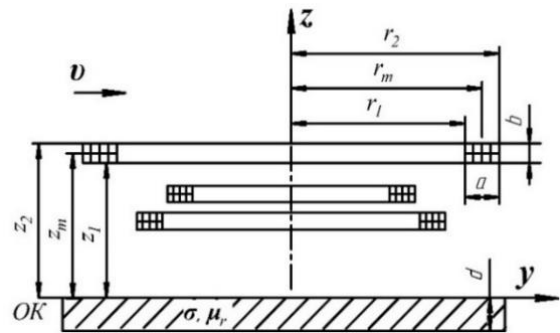


Рис. 7. Геометрична модель кругової СЗ із катушками з прямокутним поперечним перетином

Побудову метамоделі НВСП з планарною структурою СЗ у вигляді кругових витків виконано при наступних вихідних даних: $x = 0 \dots 30$ мм; $y = 0 \dots 30$ мм; $r = 2 \dots 15$ мм. Товщина струмопровідного матеріалу ОК $d = 10$ мм; висота розташування витка над ОК $z_0 = 3$ мм; частота $f = 1$ кГц; електрофізичні параметри матеріалу $\sigma = 3.745 \cdot 10^7$ См/м, $\mu_r = 1$. Проведена декомпозиція області пошуку на три підобласті: $2 \leq r \leq 6$ мм, $6 < r \leq 11$ мм, $11 < r \leq 15$ мм. Навчальні вибірки представлені графічно лініями рівня узагальненого зрізу розподілу ГВС з нанесеними на них точками КПЕ на основі ЛП_т-послідовностей для відповідних підобластей декомпозиції, які показані на рис. 8. Складові остаточної НМ-метамоделі представлено табл. 5.

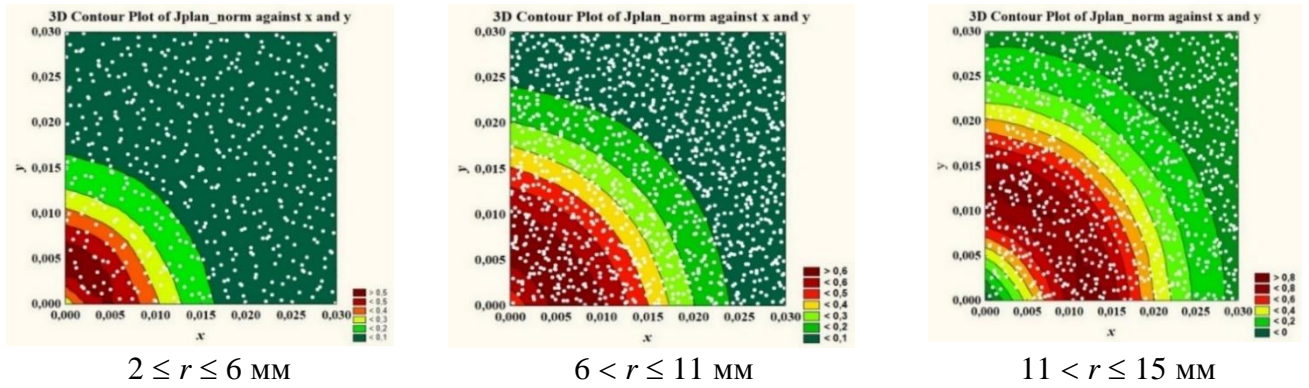


Рис. 8. Підобласті декомпозиції з нанесеними точками КПЕ

Таблиця 5. Відомості щодо побудови метамоделі НВСП з планарною структурою СЗ у вигляді кругових витків

Декомпозиційні підобласті	$N_{навч.}/N_{відтв.}$	Композит нейромереж	Метамоделі, що є складовими композиту	Комітет мереж	MAPE, %	
					навчання	відтворення
$2 \leq r \leq 6$ мм	1036/2060	J_1	RBF-3-299-1(1)	-	5.38	6.76
		J_2	RBF-3-302-1(5)	-		
		J_3	RBF-3-300-1(30)	-		
		J_4	RBF-3-305-1(46)	-		
		$J_5 = J_\Sigma$	RBF-3-297-1(4) RBF-3-298-1(9) RBF-3-299-1(12) RBF-3-306-1(48)	№4, №9, №12, №48		
$6 < r \leq 11$ мм	1299/2575	J_1	RBF-3-329-1(8)	-	4.48	4.8
		J_2	RBF-3-332-1(1)	-		
		J_3	RBF-3-328-1(8)	-		
		$J_4 = J_\Sigma$	RBF-3-326-1(3) RBF-3-329-1(20) RBF-3-326-1(42) RBF-3-332-1(80)	№3, №20, №42, №80		
		$J_5 = J_\Sigma$	RBF-3-297-1(2) RBF-3-300-1(11) RBF-3-300-1(13) RBF-3-306-1(77)	- - - -		
$11 < r \leq 15$ мм	1040/2060	J_1	RBF-3-297-1(2)	-	3.56	4.78
		J_2	RBF-3-300-1(11)	-		
		J_3	RBF-3-300-1(13)	-		
		J_4	RBF-3-306-1(77)	-		
		$J_5 = J_\Sigma$	RBF-3-297-1(1) RBF-3-301-1(22) RBF-3-309-1(63)	№1, №22, №63		

Верифікація НМ-метамоделі проведена шляхом відтворення гіперповерхні розподілу ГВС в точках КПЕ, кількість яких значно перевищувала сумарну кількість точок у навчальних вибірках та які не входили до них. Результати тестування наведено графічно на рис. 9, де зображено лінії рівня узагальненого зрізу гіперповерхні відгуку, діаграми розсіювання та гистограми розподілу похибки MAPE.

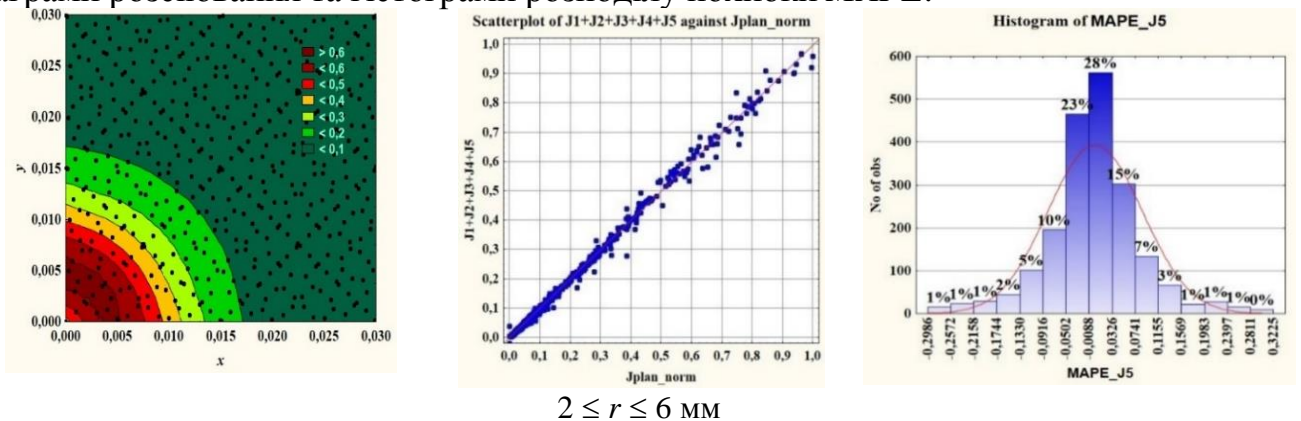
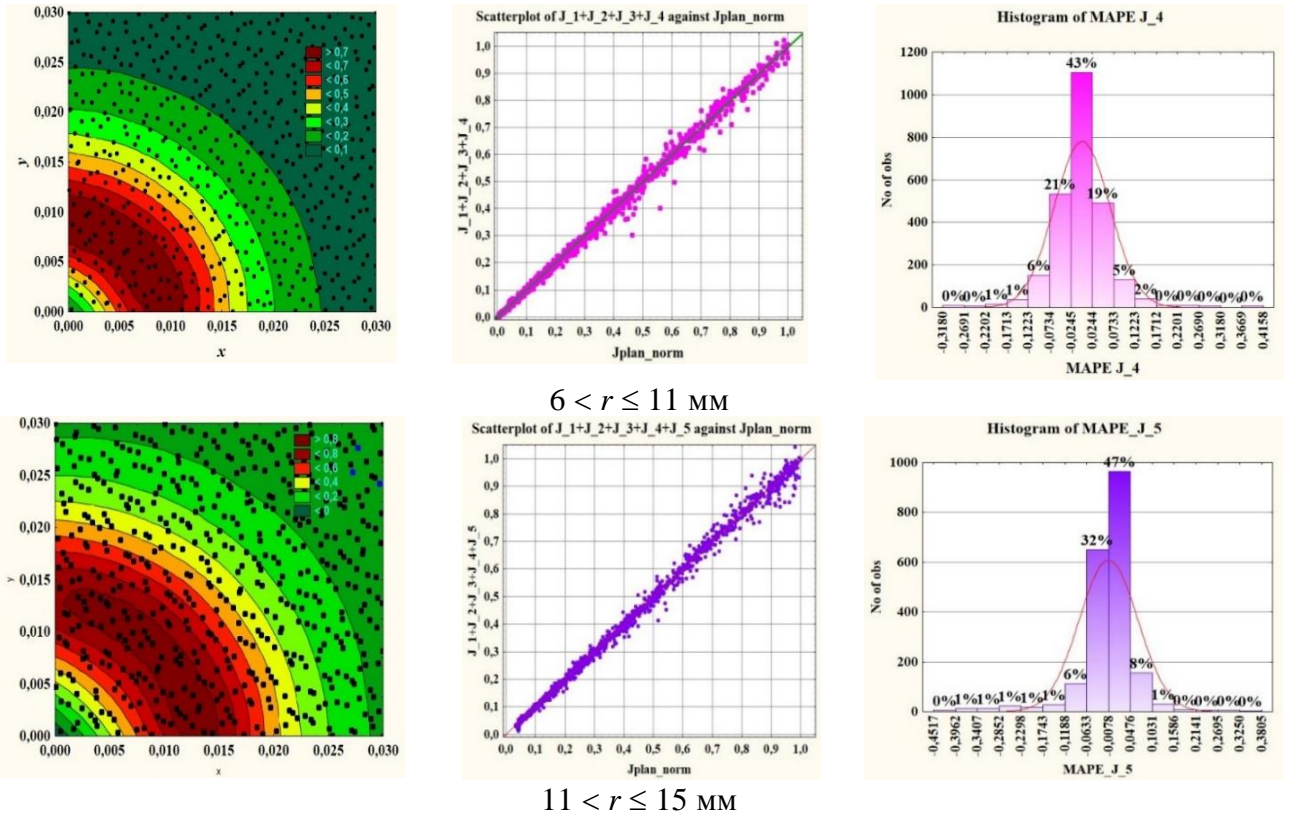
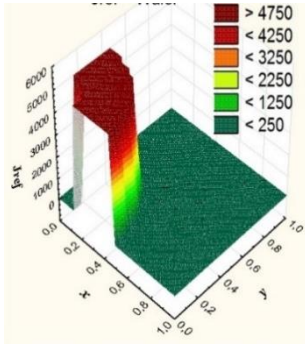


Рис. 9. Результати відтворення розподілу ГВС у декомпозиційних підобластях за допомогою створеної метамоделі



Продовження рис. 9. Результати відтворення розподілу ГВС у декомпозиційних підобластях за допомогою створеної метамоделі



З використанням створеної метамоделі в складі квадратичного критерія оптимальності проведено параметричний оптимальний сурогатний синтез СЗ НВСП з круговою планарною структурою. Бажаний однорідний розподіл ГВС задано наступним чином (див. рис. 10):

$$J_{reference} = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq r \leq 4.5 \cdot 10^{-3} \text{ м; та } r > 14.55 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\ 5000 \frac{A}{M} & \text{при } 4.5 \cdot 10^{-3} < r \leq 14.55 \cdot 10^{-3} \text{ м} \end{cases}$$

Рис. 10. Априорі визначений бажаний розподіл ГВС в зоні контролю об'єкта. Чисельні результати оптимального синтезу СЗ з кількістю секційних котушок в структурі, яку змінювали від чотирьох до семи, показано в табл. 6.

Таблиця 6. Результати оптимального синтезу кругових планарних СЗ з різною кількістю секційних котушок у структурі

Параметри k-ї котушки системи	1	2	3	4	5	6	7
$\frac{Iw_k}{r_k \cdot 10^{-3}}, \frac{A \times \text{витки}}{M}$	$\frac{0.8633}{11.6231}$	$\frac{3.737}{2.817}$	$\frac{1.816}{3.09}$	$\frac{6.117}{2.492}$	-	-	-
	$\frac{0.7}{12.672}$	$\frac{2.375}{7.032}$	$\frac{-0.891}{8.591}$	$\frac{-1.342}{4.443}$	$\frac{1.603}{2}$	-	-
	$\frac{-0.471}{3.466}$	$\frac{0.384}{1.047}$	$\frac{0.728}{12.612}$	$\frac{0.352}{5.321}$	$\frac{0.304}{5.365}$	$\frac{0.544}{2}$	-
	$\frac{0.383}{6}$	$\frac{-0.325}{3.471}$	$\frac{-1.729}{5.937}$	$\frac{0.692}{12.648}$	$\frac{0.610}{6.957}$	$\frac{1.465}{5.623}$	$\frac{-0.140}{4.286}$

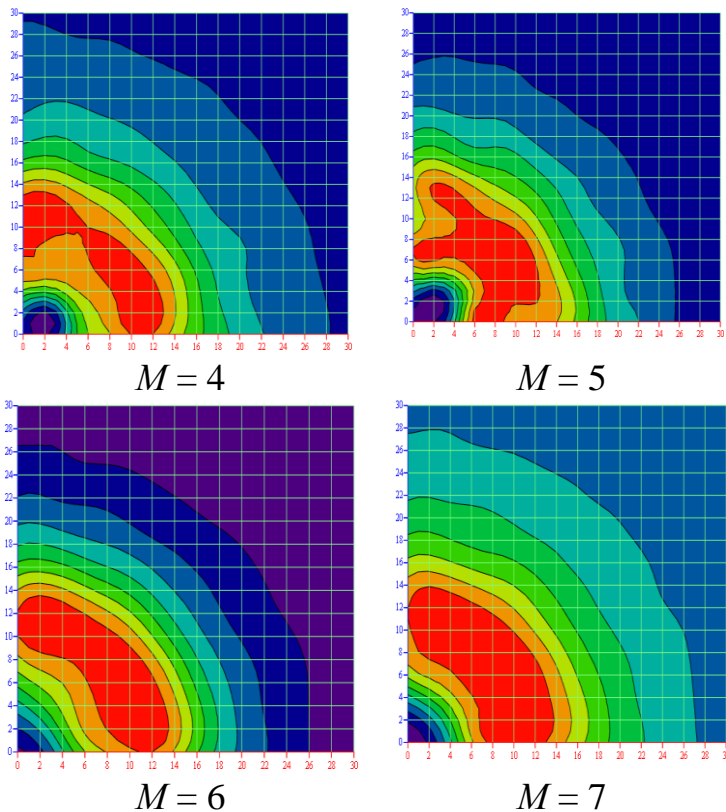


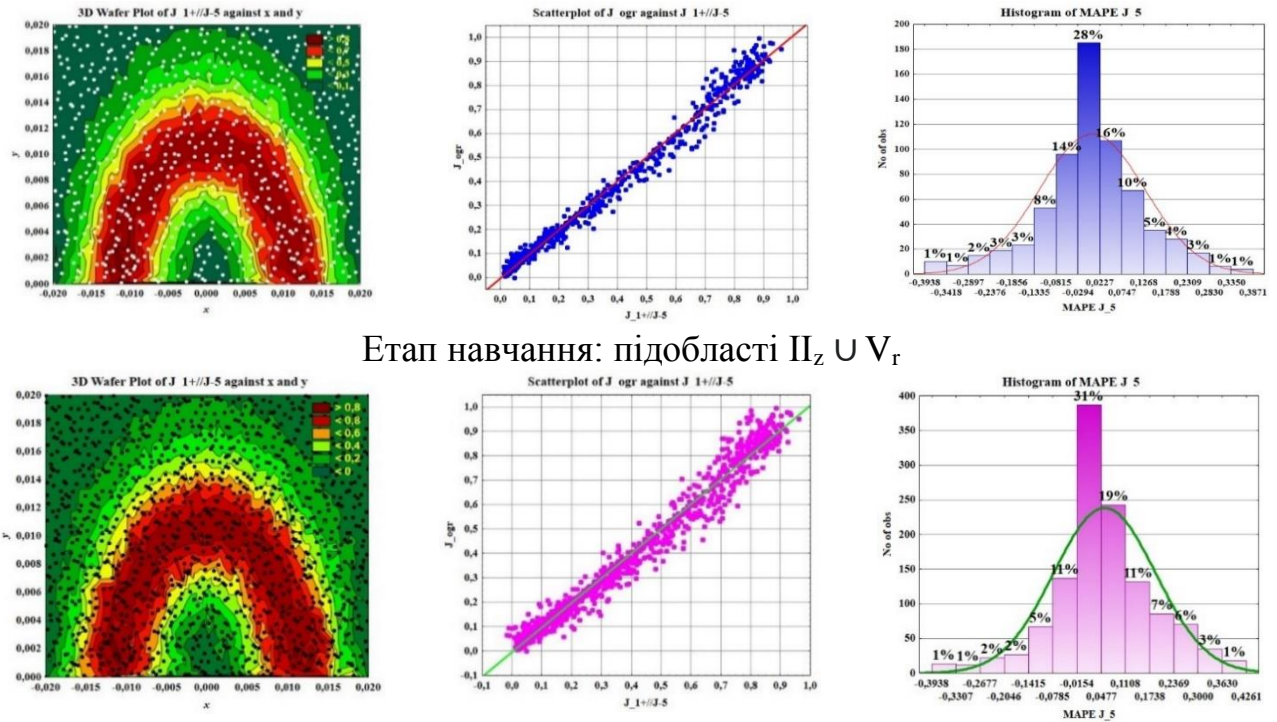
Рис. 11. Синтезований розподіл ГВС для кругових планарних СЗ з різною кількістю секційних котушок у структурі

визначена «точна» математична модель взаємодії НВСП та ОК. Для кругових рухомих НВСП з об'ємною структурою СЗ вона є такою ж як й для перетворювачів з планарною структурою. Метамоделю для цієї структури є функцією чотирьох аргументів – просторових координат x , y , радіусу витка СЗ та висоти його розташування над ОК. Побудову метамоделі НВСП з об'ємною структурою СЗ у вигляді кругових витків виконано при наступних вихідних даних: $x = -45 \dots 45$ мм; $y = 0 \dots 30$ мм; $r = 2 \dots 15$ мм. Товщина струмопровідного матеріалу ОК $d = 10$ мм; висота розташування витка над ОК $z_0 = 2 \dots 4$ мм; частота $f = 5$ кГц; електрофізичні параметри матеріалу $\sigma = 3.745 \cdot 10^7$ См/м, $\mu_r = 1$. Вектор швидкості переміщення ОК – $v = (40, 0, 0)$ м/с. Проведено декомпозицію простору пошуку на декілька підобластей: за висотою розташування НВСП над ОК на два регіони - I_z ($2 \leq z \leq 3$ мм), II_z ($3 < z \leq 4$ мм); кожний з яких ще додатково розбито за радіусом котушки - I_r ($2 \leq r \leq 3$ мм), II_r ($3 < r \leq 5$ мм), III_r ($5 < r \leq 8$ мм), IV_r ($8 < r \leq 10$ мм), V_r ($10 < r \leq 12$ мм), VI_r ($12 < r \leq 15$ мм). З огляду на це кількість точок плану експерименту, які є вузловими для апроксимації, було задано для кожної підобласті факторного простору різною відповідно до поведінки гіперповерхні відгуку з метою максимально точного її відтворення. Одна з навчальних вибірок, як приклад, представлена графічно лініями рівня узагальненого зрізу розподілу ГВС з нанесеними на них точками КПЕ на основі квазівипадкових безпараметричних адитивних R_d -послідовностей та показана на рис. 12, де також представлено результати відтворення поверхні відгуку з використанням побудованої НМ-метамоделі.

Графічно синтезований розподіл ГВС в зоні контролю об'єкта проілюстровано рис. 11. Середня відносна похибка синтезу отриманих розподілів ГВС в зоні контролю об'єкта складає 9.12 %; 8.68 %; 8.59 % та 8.07 % для структур з чотирма, п'ятьма, шістьма і сімома секційними котушками відповідно.

Результати чисельних експериментів свідчать щодо ефективності запропонованого методу синтезу НВСП відповідного типу.

У розділі також запропоновано метод оптимального синтезу кругових рухомих НВСП з об'ємною структурою СЗ. Він так само створений в рамках розробленої єдиної методології, яку розглянуто в попередньому розділі. Відповідно до неї на першому етапі



Етап навчання: підобласті $\Pi_z \cup V_r$

Етап відтворення: підобласті $\Pi_z \cup V_r$

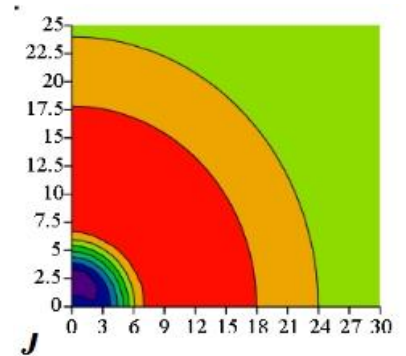
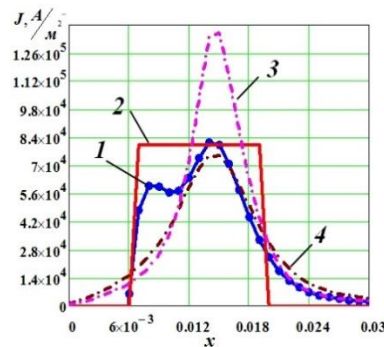
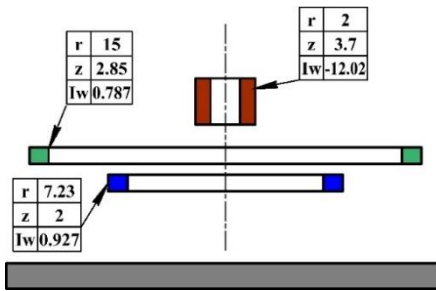
Рис. 12. Результати навчання та відтворення гіперповерхні відгуку за створеною метамоделлю для кругової об'ємної структури СЗ НВСП

Деякі чисельні показники оцінки адекватності створеної метамоделі зведено в табл.7, яка містить значення середньої відносної величини модельної похибки $MAPE$, суми квадратів залишків SS_R , середнього квадрата залишків MS_R , а також відомості щодо кількості точок КПЕ в відповідних підобластях, які було використано на етапах навчання в процесі побудови метамоделі та відтворення з її допомогою гіперповерхні відгуку.

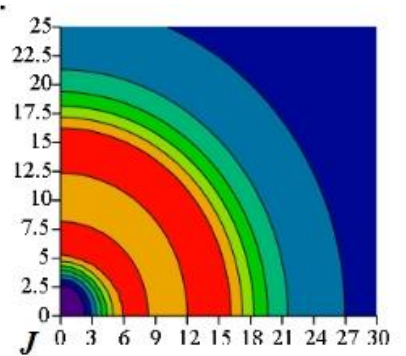
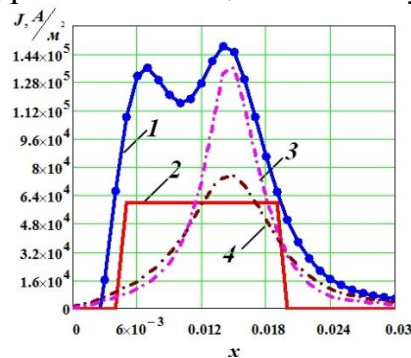
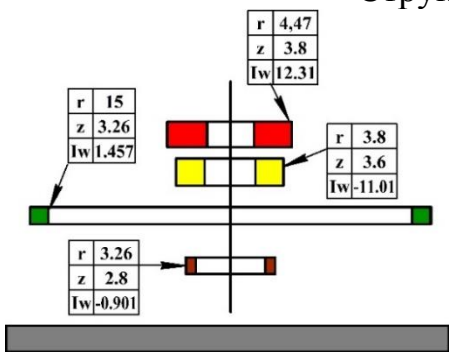
Таблиця 7. Вибіркові показники оцінки адекватності метамоделі НВСП з об'ємною структурою СЗ

Позначення підобласті	Декомпозиційна підобласть	$N_{\text{навч}} / N_{\text{відтв}}$	MAPE,%		$MS_R \cdot 10^{-3}$ середній квадрат залишків		SS_R сума квадратів залишків	
			Навчання	Відтворення	Навчання	Відтворення	Навчання	Відтворення
$I_z : 2 \leq z \leq 3 \text{ мм}$								
I_r	$2 \leq r \leq 3$	672/1210	5.15	6.51	0.233	0.577	0.157	0.699
II_r	$3 < r \leq 5$	1200/2420	10.7	15.31	0.819	2.5	0.983	6.08
III_r	$5 < r \leq 8$	1749/3680	19.09	21.31	1.76	2.95	3.09	10.88
IV_r	$8 < r \leq 10$	1312/2696	18.72	20.28	1.34	3.05	1.76	8.17
V_r	$10 < r \leq 12$	1281/2637	19.33	20.98	2.13	4.05	2.74	10.69
VI_r	$12 < r \leq 15$	2130/3630	15.31	21.2	1.19	4.17	2.551	15.14
$II_z : 3 < z \leq 4 \text{ мм}$								
I_r	$2 \leq r \leq 3$	900/1800	4.35	6.22	0.276	0.513	0.249	0.925
II_r	$3 < r \leq 5$	1295/2500	6.66	10.04	0.816	1.51	1.057	3.79
III_r	$5 < r \leq 8$	2089/4153	9.51	12.76	1.15	1.84	2.415	7.8
IV_r	$8 < r \leq 10$	1504/2900	12.68	19.74	1.03	3.03	1.551	8.8
V_r	$10 < r \leq 12$	1428/2600	9.42	14.8	1.09	2.05	1.57	5.35
VI_r	$12 < r \leq 15$	2518/4050	14.67	20.57	1.05	2.88	2.659	11.704

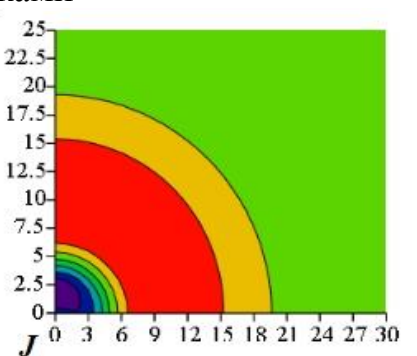
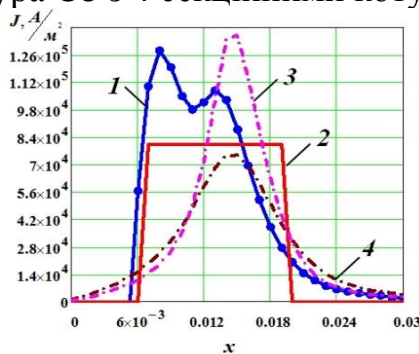
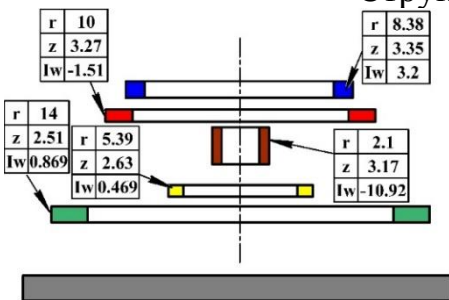
Чисельні результати синтезу НВСП при апріорі заданому П-подібному розподілі ГВС для трьох об'ємних СЗ НВСП зі структурами з 3, 4 та 5 секційних котушок представлено на рис. 13. Рисунок також містить конструкції синтезованих структур СЗ перетворювачів, що показані схематично. Для даних СЗ за «точними» математичними моделями отримано розподіли ГВС вздовж осі Ox (графік 1). 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 синтезовані розподіли ГВС представлено у вигляді ліній рівня.



Структура СЗ з 3 секційними котушками



Структура СЗ з 4 секційними котушками



Структура СЗ з 5 секційними котушками

Рис. 13. Результати сурогатного оптимального параметричного синтезу для різновидів кругових НВСП з об'ємними структурами СЗ

Показано, що має місце певне невиконання умов синтезу щодо інтенсивності ГВС в зоні контролю, яких не має можливості уникнути при послідовному ускладненні

структури СЗ. Але цей факт не є критичним тому, що позитивні тенденції щодо розширення зони однорідності розподілу ГВС є стійкими і саме це є надважливим. Вищий за визначений бажаний рівень інтенсивності ГВС лише додає переваг синтезованим конструкціям НВСП та покращує їх можливості щодо виявлення дефектів. Також очевидними є переваги синтезованих СЗ в порівнянні з їх класичними аналогами - одинарними витками. З огляду на це вважатимемо найкращою структуру СЗ із чотирма секційними котушками.

В четвертому розділі на основі запропонованого єдиного методологічного підходу до синтезу рухомих ВСП створено метод оптимального сурогатного синтезу рамкових рухомих НВСП з планарною структурою СЗ. Завдяки своїй геометрії цей тип НВСП відрізняється можливістю реалізації специфічних розподілів ГВС, що дозволяє ефективно використовувати перетворювачів при неруйнівному контролі.

Для побудови методу використано «точну» електродинамічну модель (1), в якій функція форми витка має наступний вигляд:

$$S(\xi, \eta) = -j \cdot \frac{4}{\xi} \cdot \sin(a \cdot \xi) \cdot \sin(b \cdot \eta), \quad (5)$$

де a та b – геометричні параметри витка СЗ.

Геометрична модель рамкового НВСП, що застосована для створення «точної» математичної, наведена на рис. 14. Планарну структуру рамкового НВСП, дискретні складові СЗ якого мають прямокутний поперечний перетин, проілюстровано рис. 15.

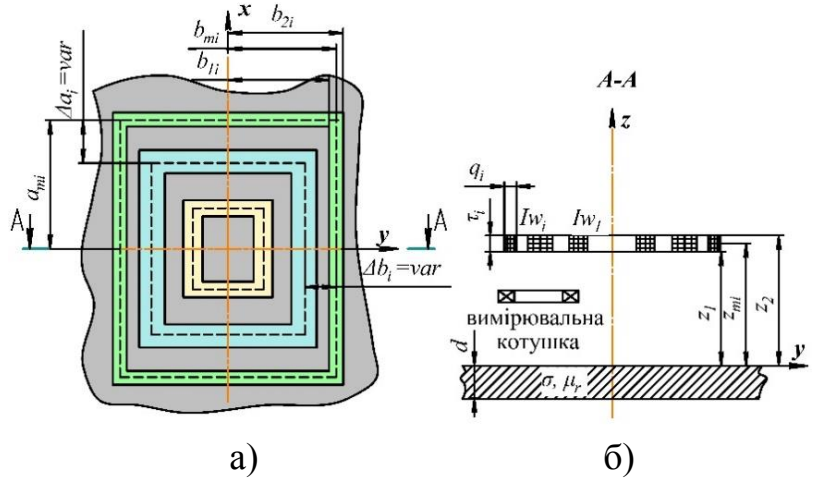
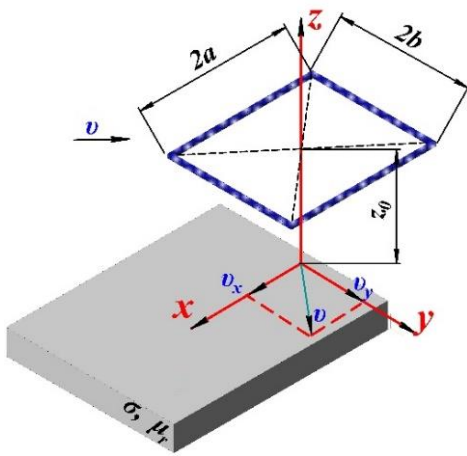


Рис. 14. Геометрична модель рамкового НВСП

Рис. 15. Планарна СЗ рамкового НВСП: а) загальний вигляд; б) перетин А-А

Перехід від розрахунків розподілу ГВС в ОК від нескінченно тонкого прямокутного витка збудження до обчислень відповідного розподілу, викликаного секційною котушкою з прямокутним поперечним перетином, виконано інтегруванням за площею перетину:

$$\frac{w}{q \cdot \tau} \cdot \left[\int_{-q/2}^{q/2} \sin((a_m + p) \cdot \xi) \cdot \sin((b_m + p) \cdot \eta) dp \right] \cdot \left[\int_{z_m - \tau/2}^{z_m + \tau/2} e^{-g \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} dg \right] = \frac{w}{q \cdot \tau} \cdot I_s(a_m, b_m, q) \cdot I_E(z_m, \tau) \quad (6)$$

де $q = b_2 - b_1$; $\tau = z_2 - z_1$; $a_m = (a_1 + a_2)/2$; $b_m = (b_1 + b_2)/2$; $z_m = (z_1 + z_2)/2$ - середнє значення розмірів та висоти розташування котушки над ОК відповідно; p, g – змінні інтегрування.

Аналітичний вираз для складової $I_E(z_m, \tau)$ має наступний вигляд:

$$I_E(z_m, \tau) = \int_{z_m - \tau/2}^{z_m + \tau/2} e^{-g \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} dg = \frac{e^{z_m \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}}}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot \left(e^{-\left(\frac{\tau}{2} \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}\right)} - e^{\left(\frac{\tau}{2} \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}\right)} \right) \quad (7)$$

Остаточна математична модель секційної котушки СЗ НВСП, що визначає розподіл ГВС на поверхні ОК визначається за формулами (1) із врахуванням вище наведених співвідношень.

На етапі створення НМ-метамоделі показано, що функціональна апроксимаційна залежність розподілу ГВС для рухомого рамкового НВСП з планарною структурою СЗ є багатовимірною та залежить від декількох параметрів, а саме просторових координат x й y на поверхні ОК в зоні контролю та геометричних розмірів a і b секцій котушок СЗ.

Метамоделю рамкового рухомого НВСП із планарною структурою СЗ створено при наступних вихідних даних: $d = 10$ мм, $z_0 = 3$ мм, $I = 1$ А, $f = 1$ кГц; $\sigma = 3.745 \cdot 10^7$ См/м, $\mu_r = 1$. Параметри моделі, які варіюють, було задано в межах: $x = -35 \dots 35$ мм; $y = 0 \dots 25$ мм; підлягали розгляду квадратні витки $a = 3 \dots 15$ мм. Швидкість переміщення ОК задано вектором $\vec{v} = (40, 0, 0)$ м/с. При побудові метамоделі виконано декомпозицію на шість підобластей: $I_a (3 \leq a \leq 5$ мм), $II_a (5 < a \leq 7$ мм), $III_a (7 < a \leq 9$ мм), $IV_a (9 < a \leq 11$ мм), $V_a (11 < a \leq 13$ мм), $VI_a (13 < a \leq 15$ мм). Вказано, що для отримання прийнятної точності на етапі навчання застосовано адитивну НМ-регресію, кількість проміжних рівнів якої визначено рівнем відносної середньої похибки апроксимації $MAPE$, що не перевищувала 15%. На кожному проміжному рівні НМ-регресії використано комітети із мереж, продуктивність яких складала більше 90%, та застосовано прийняття рішень усередненням за ансамблем. Завдяки такій гібридній побудові адитивної НМ-регресії отримано значення $MAPE$ для складної топології розподілу ГВС на рівні від 7.38% до 14.91% на етапі її навчання. Рис. 16 демонструє навчальні вибірки для деяких підобластей декомпозиції з нанесеними на них точками КПЕ.

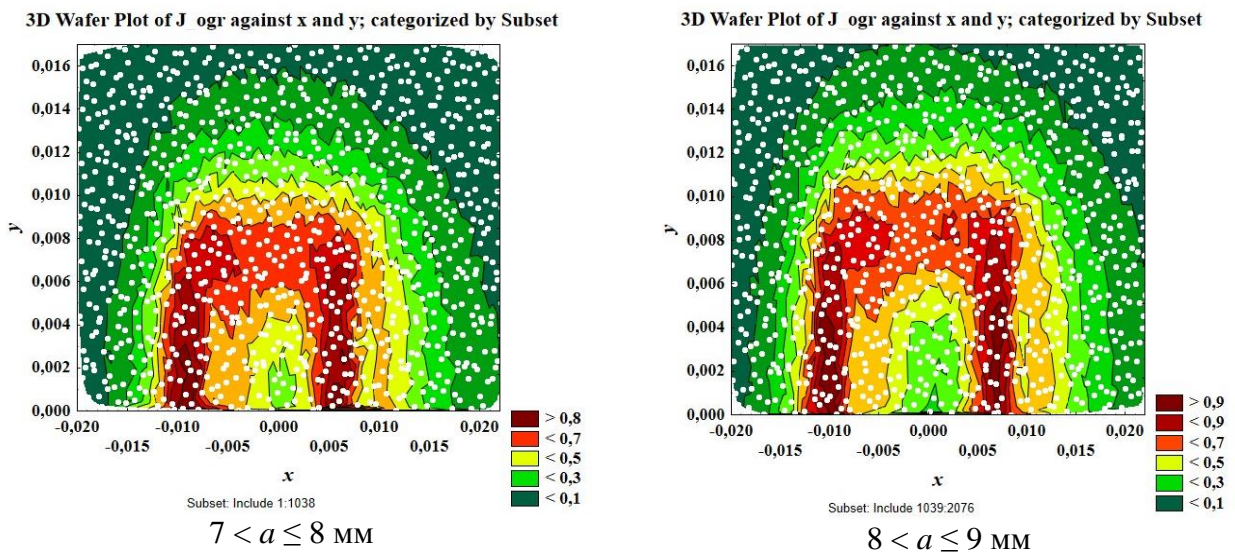


Рис. 16. Навчальна вибірка у вигляді ліній рівня узагальнених зрізів розподілу ГВС з нанесеними точками КПЕ на ЛП_τ-послідовностях для підобласті III_a

Табл. 8 містить розраховані значення модельної похибки на етапах навчання НМ-метамоделі та відтворення з її використанням гіперповерхні відгуку. Графічно результати моделювання щодо відтворення деяких підобластей багатовимірної поверхні відгуку з використанням побудованої НМ-метамоделі проілюстровано рис.17.

Таблиця 8. Похибка *MAPE* метамоделі квадратного НВСП з планарною структурою СЗ

Позначення підобласті	Декомпозиційна підобласть	N _{навч} / N _{відтв}	MAPE, %	
			навчання	відтворення
I _a	$3 \leq a \leq 5$	2070/4090	7.78	8.07
II _a	$5 < a \leq 7$	2082/4090	7.55	8.22
III _a	$7 < a \leq 9$	2076/4090	7.38	7.97
IV _a	$9 < a \leq 11$	2076/4090	8.13	8.69
V _a	$11 < a \leq 13$	2081/4090	8.86	9.43
VI _a	$13 < a \leq 15$	2143/4162	14.91	14.27

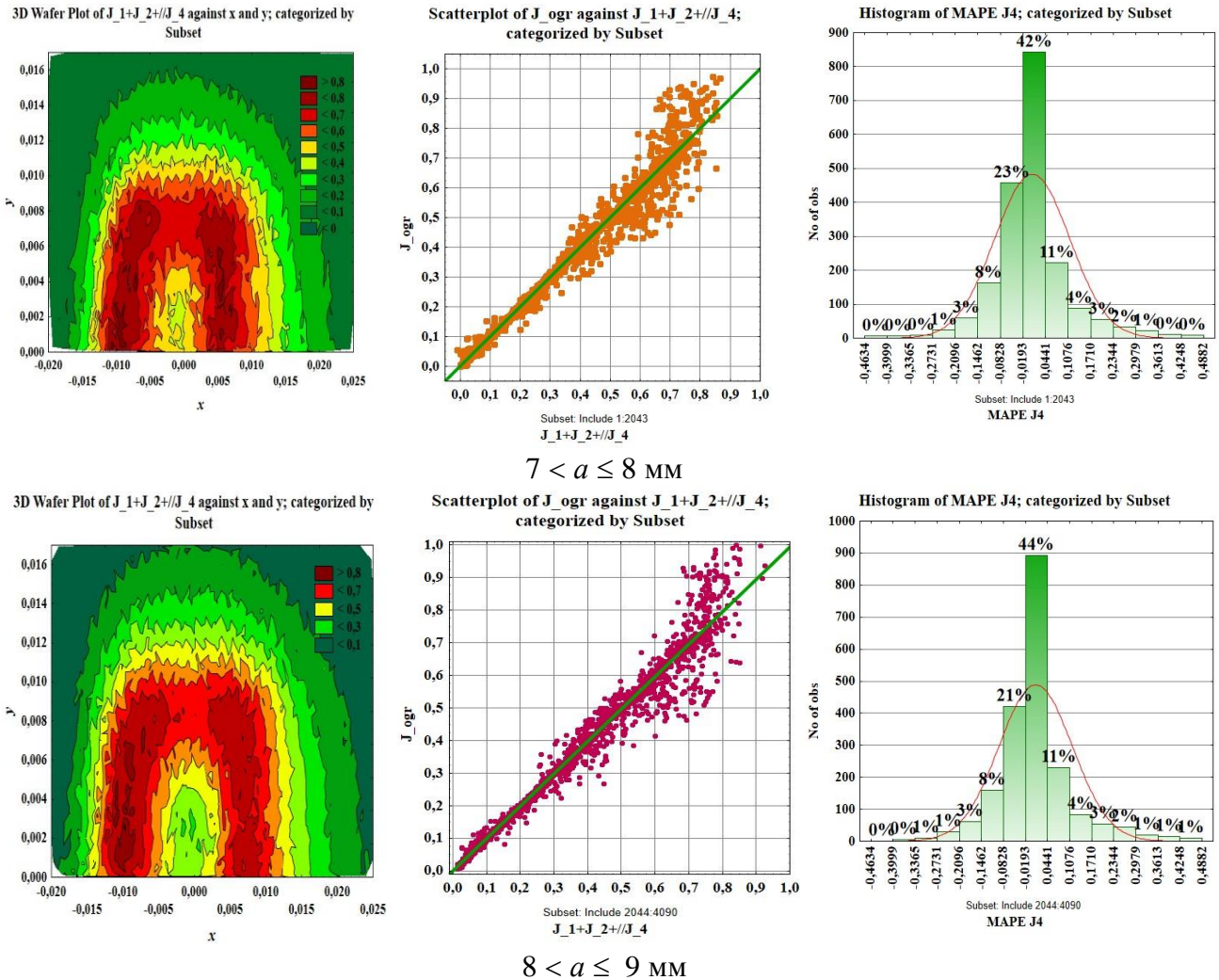


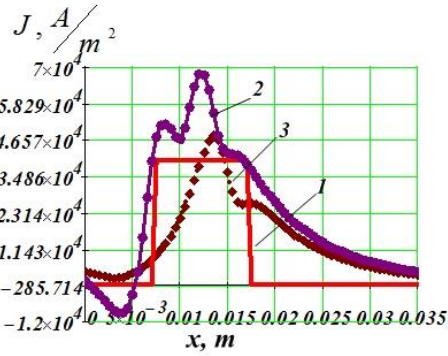
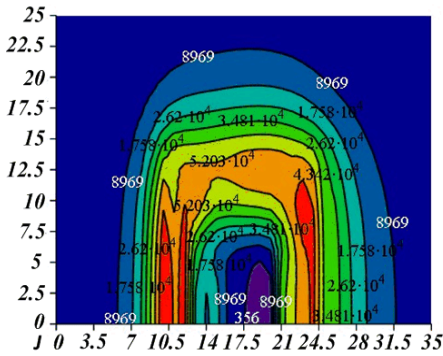
Рис. 17. Відтворення поверхні відгуку у вигляді ліній рівня узагальнених зрізів розподілу ГВС для підобласті III_a за допомогою метамоделі для рухомого квадратного НВСП з планарною структурою СЗ

Синтезовані варіанти конструкцій рухомих квадратних НВСП з планарною

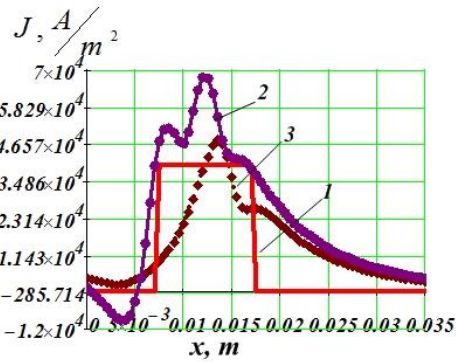
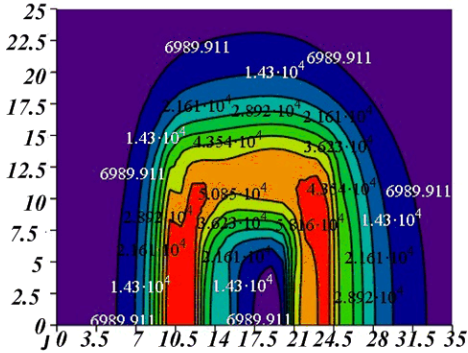
структуру СЗ, що отримано в результаті умовної оптимізації з використанням створеної метамоделі, показано в табл. 9 та на рис. 18, де розглянуто СЗ перетворювачів з різною кількістю секцій M . У вигляді ліній рівня наведено розподіли ГВС, що створені синтезованими СЗ та обчислені за "точною" електродинамічною моделлю. Для візуального порівняння синтезованого (графік 2) та апріорі заданого розподілів ГВС (графік 1) представлено графіки їх зміни вздовж осі Ox . Також на рисунку показано розподіл ГВС, створений одинарним квадратним витком розміром 15×15 мм (графік 3).

Таблиця 9. Технічні параметри синтезованих рухомих квадратних НВСП з планарною СЗ та різною кількістю секційних котушок у структурі

Синтезовані системи збудження	M=3		M=4		M=5	
	а, мм	Iw , А×витки	а, мм	Iw , А×витки	а, мм	Iw , А×витки
№	а, мм	Iw , А×витки	а, мм	Iw , А×витки	а, мм	Iw , А×витки
1	6.39	-0.837	6.37	-0.649	6.64	-1.495
2	9.5	1.1	8.183	0.398	7.98	1.246
3	13.5	1.15	10.23	0.9324	10.96	0.613
4	-	-	13.49	0.92	11.15	0.205
5	-	-	-	-	14.26	0.82

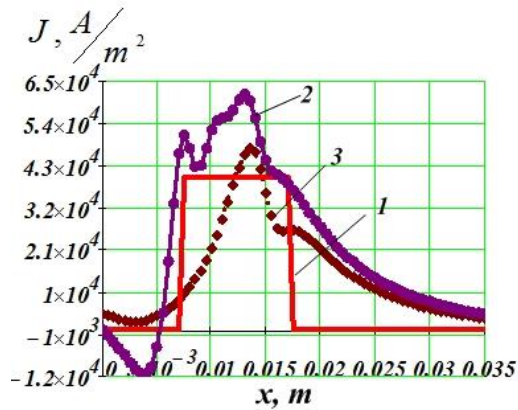
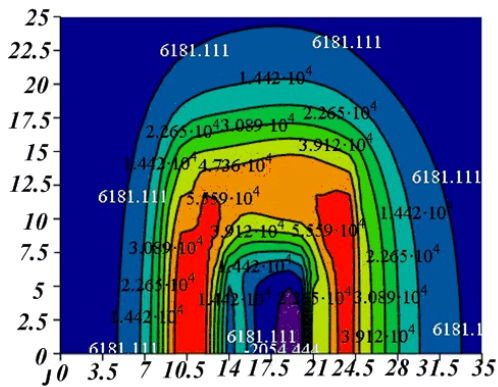


M=3



M=4

Рис. 18. Результати синтезу рухомих НВСП з квадратною планарною СЗ, обчислені за "точною" електродинамічною моделлю



$M=5$

Продовження рис. 18. Результати синтезу рухомих НВСП з квадратною планарною СЗ, обчислені за “точною” електродинамічною моделлю

Підсумовуючи результати моделювання, зазначено, що для синтезованих структур СЗ порівняльний аналіз отриманих розподілів ГВС показав практично однакове перевищення рівня інтенсивності вихрових струмів для всіх їх варіантів, але виконання умов однорідності яких не однакове. Вказано, що перевищення рівня інтенсивності вихрових струмів над заданим слід вважати позитивним фактом з причин кращих умов виявлення дефектів. Найкращий результат однорідності має СЗ із чотирма секційними котушками. Відзначено також, що простіші та складніші за вказану структуру СЗ не дозволили досягти кращого результату. Всі варіанти розглянутих структур показали кращі результати щодо однорідності розподілу ГВС в порівнянні із класичним НВСП із СЗ у вигляді одинарного квадратного витка.

В п'ятому розділі відповідно до запропонованого єдиного методологічного підходу до синтезу рухомих ВСП створено метод оптимального сурогатного синтезу тангенціальних рамкових рухомих НВСП з об'ємною структурою СЗ. Внаслідок генерування вихрових струмів, що протікають в напрямку перпендикулярному до поверхні ОК, галузь використання перетворювачів розширена на дефекти типу розшарувань. «Точна» математична модель для цього типу НВСП має вигляд (1), але з функцією форми витка наступного вигляду:

$$S(\xi, \eta) = -\frac{2 \cdot \xi \cdot e^{j \cdot x_0 \cdot \xi} \cdot \sin(b \cdot \eta)}{(\xi^2 + \eta^2)} \cdot \left(e^{a \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} - e^{-a \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \right) \quad (8)$$

Геометрична модель рамкового тангенціального НВСП, що застосована для створення «точної» математичної, наведена на рис. 19. Також розглянуто можливі варіанти конструкцій тангенціальних НВСП, що відрізняються розташуванням вимірювальної котушки перетворювача (рис. 20). Від її орієнтації у просторі залежить, які складові ГВС J_x, J_y чи J_z формують магнітний потік, що пронизує контур котушки. Розподіл ГВС для рухомого тангенціального квадратного НВСП у парадигмі сурогатного моделювання описано чотиривимірною апроксимаційною залежністю $\hat{J} = f(x, y, a, x_0)$, де x й y є просторовими координатами на поверхні ОК в зоні контролю.

Масив навчальної вибірки даних в точках КПЕ створено для параметрів, що є змінними в межах: $x = 0 \dots 15$ мм, $y = -25 \dots 25$ мм, $a = 4 \dots 16$ мм, $x_0 = 0 \dots 4$ мм, для яких розраховано розподіл ГВС за «точною» моделлю.

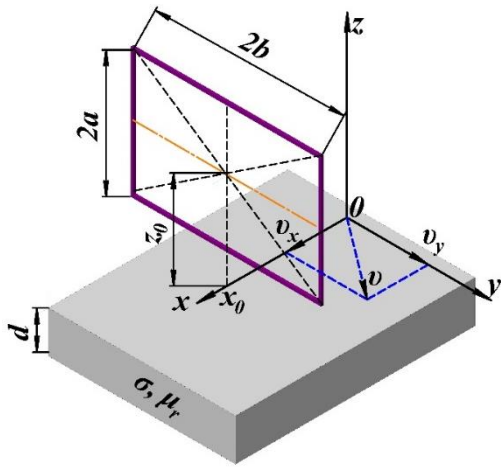


Рис. 19. Рамкове джерело збуджувального поля у вигляді витка прямокутної форми, що розташоване вертикально до ОК

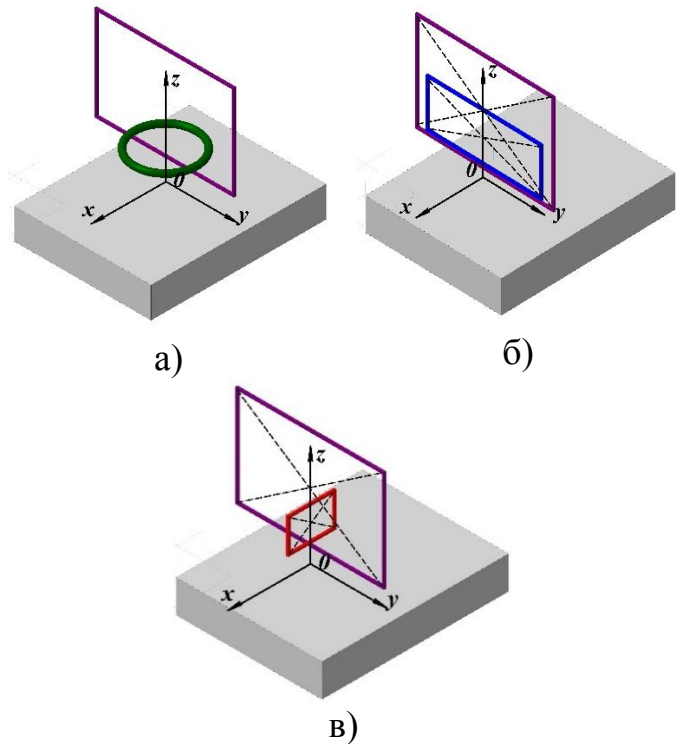


Рис. 20. Варіанти конструкцій рамок тангенціальних НВСП

Всі інші параметри вважатимемо сталими. Область пошуку за розміром котушки a розділена на шість підобластей: $4 \leq a \leq 6$ мм, $6 < a \leq 8$ мм, $8 < a \leq 10$ мм, $10 < a \leq 12$ мм, $12 < a \leq 14$ мм, $14 < a \leq 16$ мм. Вектор швидкості переміщення ОК становив $\vec{v} = (0, 40, 0)$ м/с. Було створено метамодель рухомого квадратного НВСП з об'ємною структурою СЗ, деякі відомості про яку містять табл. 10 та 11.

Таблиця 10. Відомості щодо створення метамоделі квадратного рухомого тангенціального НВСП з об'ємною структурою СЗ для підобласті $14 < a \leq 16$ мм на етапах навчання НМ ($N_{навч.} = 2050$) та відтворення поверхні відгуку ($N_{відтв.} = 4090$)

Рівень ANN-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)		
\hat{J}_3	RBF-4-245-1(92)	4	4.47
	RBF-4-217-1(14)		
	RBF-4-228-1(76)		
	RBF-4-252-1(141)		
	RBF-4-255-1(150)		

Таблиця 11. Похибки апроксимації гіперповерхні відгуку з використанням НМ-метамоделі рухомого квадратного тангенціального НВСП з об'ємною структурою СЗ

Позначення підобласті	Декомпозиційна підобласть	$N_{\text{навч}} / N_{\text{відтв}}$	MAPE, %		SS _R		MS _R · 10 ⁻³	
			навчання	відтворення	навчання	відтворення	навчання	відтворення
I _a	$4 \leq a \leq 6$	2500/4090	2.37	2.4	0.0974	0.183	0.038	0.0447
II _a	$6 < a \leq 8$	2500/4090	2.14	2.18	0.0745	0.133	0.0298	0.0325
III _a	$8 < a \leq 10$	2510/4090	2.43	2.5	0.105	0.188	0.0418	0.0459
IV _a	$10 < a \leq 12$	2500/4090	2.9	2.81	0.115	0.213	0.046	0.052
V _a	$12 < a \leq 14$	2500/4090	2.89	2.87	0.118	0.223	0.0472	0.0545
VI _a	$14 < a \leq 16$	2500/4090	3.99	4.47	0.11	0.227	0.044	0.0555

Чисельні експерименти щодо оптимального синтезу здійснено для об'ємних структур СЗ тангенціальних НВСП із різною кількістю секційних котушок $M = 2-5$. Чисельні результати сурогатного синтезу наведено в табл. 12. Графічний матеріал, що ілюструє найкращу структуру СЗ з двома секційними котушками, наведено на рис. 21. На рисунку представлено у вигляді ліній рівня синтезований розподіл ГВС. Розрахунок розподілу ГВС виконано для СЗ з отриманими в результаті синтезу параметрами за «точною» електродинамічною моделлю (графік 1). Графіки розподілу вздовж осей ОХ та ОУ приведено також. З метою порівняльного аналізу на рисунку показаний бажаний розподіл ГВС (графік 2) та розподіл, що утворений одинарним квадратним витком з розмірами 16 x 16 мм (графік 3). Всі інші синтезовані структури СЗ також реалізують близький до однорідного розподіл ГВС, але є неприйнятними з технологічної точки зору.

Таблиця 12. Синтезовані конструкції рухомого квадратного тангенціального НВСП з об'ємною структурою СЗ

№ секції	Синтезовані системи збудження											
	M=2			M=3			M=4			M=5		
	a, мм	x ₀ , мм	I _w , A×витки	a, мм	x ₀ , мм	I _w , A×витки	a, мм	x ₀ , мм	I _w , A×витки	a, мм	x ₀ , мм	I _w , A×витки
1	6.9	2.23	-32.14	7	3.13	-26.96	7.64	1.19	-27.94	5.46	4	-19.59
2	11.77	1.88	11.23	8.74	1.29	15.38	12	2.17	2.55	8.34	1.18	-100
3				15.92	2.6	1.537	12.56	1.15	9.5	8.34	1.05	100
4							15.1	3.84	-0.327	9.56	1.6	20.09
5										5.45	0	-33.57

Результати модельних розрахунків щодо створення оптимальних СЗ об'ємної структури для тангенціальних рухомих рамкових НВСП свідчать про ефективність запропонованого методу сурогатного параметричного синтезу, що забезпечує рівномірний розподіл ГВС на поверхні ОК та гарантує однорідну чутливість перетворювачів до дефектів.

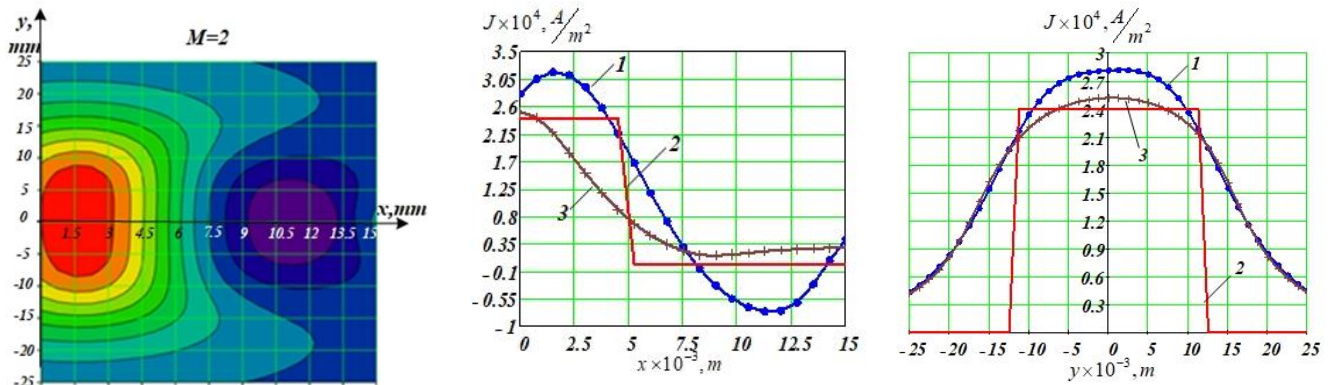


Рис. 21. Розподіл ГВС синтезованого рухомого квадратного тангенціального НВСП з об'ємною структурою

В шостому розділі запропоновано ряд можливих підходів до практичної реалізації СЗ синтезованих НВСП, головна ідея яких полягає в мінімальному спотворенні при виготовленні перетворювачів теоретично отриманих МРС секційних котушок трьома різними способами, оскільки позиціонування секцій котушок у просторі та забезпечення умов включення за «полем» не викликає технічних труднощів. На рис. 22 наведено гістограми відносних похибок всіх цих способів нівелювання спотворень розподілу ГВС при виготовленні конкретного варіанта синтезованого НВСП на практиці.

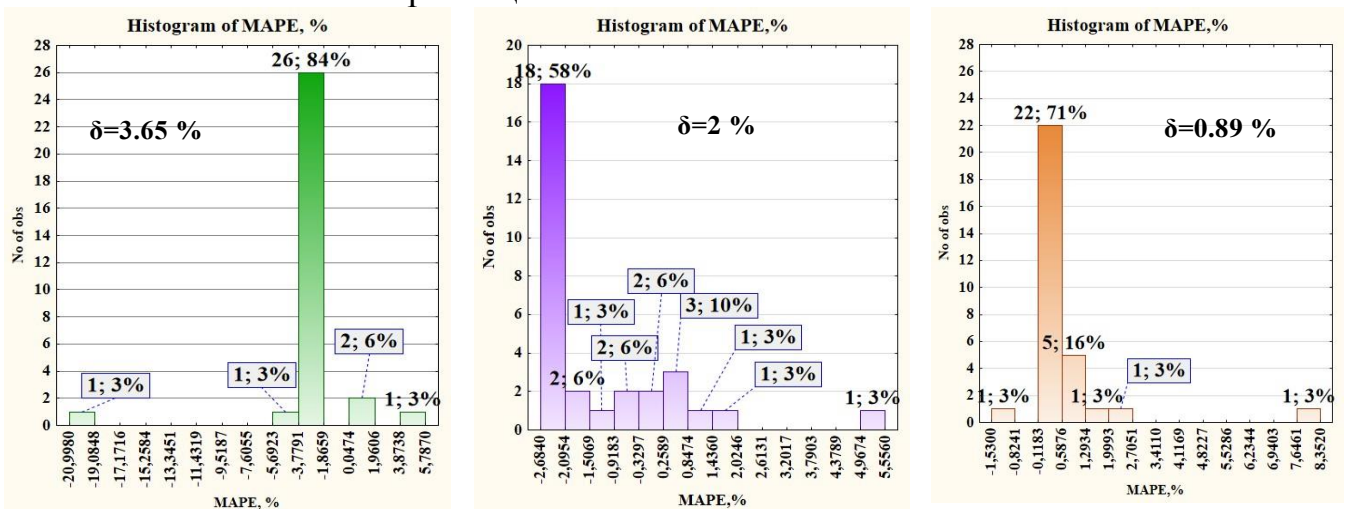


Рис. 22. Гістограми відносних похибок реалізації синтезованого розподілу ГВС при виготовленні НВСП на практиці трьома різними способами

У **висновках** сформульовано основні результати дисертаційного дослідження.

У **додатках** наведено акти про практичне впровадження результатів дисертаційної роботи; чотиривимірний однорідний КПЕ на основі R_d -послідовностей для побудови метамоделі кругового НВСП з об'ємною структурою СЗ у декомпозиційній підобласті; тривимірний однорідний КПЕ на основі $ЛП_r$ -послідовностей для побудови метамоделі рамкового НВСП з планарною структурою СЗ у декомпозиційній підобласті; вагові коефіцієнти RBF-нейронної мережі останнього рівня адитивної регресії гіперповерхні відгуку у відповідній декомпозиційній підобласті для метамоделі рамкового НВСП з планарною структурою СЗ.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-прикладна проблема створення теорії сурогатного оптимального параметричного синтезу всього класу рухомих накладних вихрострумів перетворювачів з однорідною чутливістю до дефектів порушень суцільності матеріалів й виробів щодо забезпечення необхідних умов їх ідентифікації комп'ютерними системами неруйнівного контролю. До виконаних дисертаційних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. В дисертації виконано аналітичний огляд науково-технічної літератури з метою дослідження відомих методів оптимального синтезу вихрострумів перетворювачів із заданими властивостями електромагнітного поля зондування об'єктів, які застосовуються в якості компонентів комп'ютерних систем виявлення та ідентифікації дефектів суцільності, методів розв'язку нелінійних обернених задач та методів створення метамоделей для використання при оптимальному сурогатному синтезі накладних вихрострумів перетворювачів. Визначено найперспективніші тенденції їх розвитку та застосування.

2. Запропоновано єдину методологію сурогатного оптимального синтезу всього класу рухомих вихрострумів перетворювачів із однорідною чутливістю в зоні контролю, що містить наступні методи: метод розрахунку за «точними» електродинамічними моделями розподілу густини вихрових струмів всередині об'єкту контролю; метод побудови багатовимірних однорідних комп'ютерних планів експериментів з гарантовано низькими показниками центрованої та циклічної розбіжностей на основі комбінацій квазівипадкових R_d -послідовностей та ЛП-послідовностей Соболя; адитивний комітетний нейромережевий метод побудови багатовимірних метамоделей вихрострумів перетворювачів; метод пошуку глобального екстремуму на основі алгоритмів стохастичної метаевристичної умовної оптимізації.

3. В рамках запропонованого єдиного методологічного підходу створено багатовимірні нейромережеві метамоделі кругових рухомих накладних вихрострумів перетворювачів з планарною та об'ємною структурами систем збудження, що характеризуються прийнятною точністю апроксимації. Відносна похибка апроксимації для метамоделі накладного вихрострумів перетворювача з планарною структурою системи збудження не перевищує 6.76 % для всіх областей декомпозиції, а для метамоделі накладного вихрострумів перетворювача з об'ємною структурою – змінюється від 6.22 % до 21.31 % в деяких випадках. Час обчислення в одній контрольній точці за створеними нейромережевими метамоделями складає менше ніж 1 с для планарної структури системи збудження та до 4 с - для об'ємної на протигагу часу в 23-54 с при розрахунку за «точною» електродинамічною моделлю.

4. З використанням комітетів нейромереж та концепції адитивної регресії побудовано багатовимірну метамоделю рамкового рухомого накладного вихрострумів перетворювача з планарною структурою системи збудження. Відносна похибка відтворення гіперповерхні відгуку складає від 7.97 % до 14.27 % для різних областей декомпозиції. Часова обчислювальна продуктивність створеної метамоделі складає менше ніж 2 с, що значно менше часу розрахунку в 28-33 с, який витрачається на розрахунок за «точною» електродинамічною моделлю в одній контрольній точці

5. Створено багатовимірну нейромережеву метамодель рамкового рухомого тангенціального накладного вихрострумowego перетворювача з об'ємною структурою системи збудження, яка адекватно відтворює гіперповерхню відгуку з відносною похибкою, що змінюється від 2.18 % до 4.47 % для окремих областей декомпозиції. Часова обчислювальна ресурсомісткість в одній контрольній точці для такої метамоделі менше ніж 1 с на відміну від розрахунку за «точною» моделлю, що складає 12-18 с.

6. Запропоновано методи оптимального синтезу кругових рухомих накладних вихрострумowych перетворювачів із однорідною чутливістю в зоні контролю з планарною та об'ємною структурами систем збудження. Виконано їх практичну реалізацію у вигляді відповідного програмного забезпечення. На чисельних експериментах доведено їх адекватність. Похибка синтезу системи збудження накладного вихрострумowego перетворювача з планарною структурою складає 8.07 %. При цьому площі зон однорідності розподілів густини вихрових струмів синтезованої конструкції в порівнянні з класичним аналогом складають 125.66 мм² та 90.27 мм² відповідно. Для об'ємної структури системи збудження цей показник складає – 301.44 мм² та 87.96 мм².

7. На основі створеної методології розроблено метод оптимального синтезу рамкових рухомих накладних вихрострумowych перетворювачів із однорідною чутливістю в зоні контролю з планарною структурою системи збудження. Метод реалізовано програмно та апробовано чисельним моделюванням на низці прикладів, що дозволило довести його ефективність. Площу зони однорідного розподілу густини вихрових струмів синтезованої системи збудження накладного вихрострумowego перетворювача збільшено в 3.6 рази в порівнянні з класичним аналогом (196.25 мм² та 53.96 мм² відповідно).

8. Побудовано метод оптимального сурогатного параметричного синтезу рамкових рухомих тангенціальних накладних вихрострумowych перетворювачів із однорідною чутливістю в зоні контролю з об'ємною структурою системи збудження, використання яких дозволяє забезпечити необхідні умови для ідентифікації дефектів суцільності виробів й матеріалів при застосуванні їх у складі комп'ютерних систем неруйнівного контролю. Площа зони контролю з однорідним розподілом густини вихрових струмів складає для синтезованої структури – 96 мм², а для класичного аналога – 8 мм². Отже, спостерігається її збільшення в 12 разів при похибці синтезу – 18.04 %.

9. Результати дисертаційних досліджень впроваджено в промисловості в АТ «Укрзалізниця», виробничий підрозділ служби сигналізації та зв'язку «Шевченківська дистанція сигналізації та зв'язку», філії «Науково-виробничого центру технічної діагностики «Техдіагаз» Черкаська діагностична дільниця АТ «Укртрансгаз» та в навчальний процес ЧДТУ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» на кафедрах приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій і виробництва приладів відповідно.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] The RBF-Metamodel Development of Surface Eddy-Current Probe for the Surrogate Optimal Synthesis Problem [Text] / V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov // International Journal “NDT Days”. – 2018. – Vol. 1, Issue 4. – P. 425-433. (Болгарія).

[2] Застосування нейрокомп'ютинга на етапі побудови метамоделей в процесі оптимального сурогатного синтезу антен [Текст] / В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, В. В. Тичков // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2018. – № 74. – с. 60-72. (**Web of Science**).

[3] Нейромережева метамодел ь циліндричного накладного вихрострумowego перетворювача як складова сурогатного оптимального синтезу [Текст] / В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, В. В. Тичков // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2018. – № 3 (66). – Т. 1. – С. 32–38.

[4] Studying the computational resource demands of mathematical models for moving surface eddy current probes for synthesis problems [Text] / R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, V. V. Tychkov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. - № 5/5 (95). - P. 39-46. (**Scopus**).

[5] Побудова RBF-метамоделей структур збудження рухомого концентричного вихрострумowego перетворювача [Текст] / В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, В. В. Тичков // Електротехніка та електромеханіка. – 2019. – № 2 . – С. 28-38. (**Web of Science**).

[6] Nonlinear surrogate synthesis of the surface circular eddy current probes / Halchenko V. Ya., Trembovetska R. V., Tychkov V. V., Storchak A. V. // Przegląd elektrotechniczny. – 2019. - № 9. – P. 76-82. (**Web of Science, Scopus**).

[7] Оптимальний сурогатний параметричний синтез накладних кругових неспіввісних вихрострумowych перетворювачів із рівномірною чутливістю в зоні контролю [Текст] / Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко, В. В. Тичков // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2019. – № 2(69). - Частина 2. - С. 118-125.

[8] Линейный синтез несоосных накладных вихретоковых преобразователей [Текст] / В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецкая, В. В. Тычков // International Journal “NDT Days”. - 2019. – Vol. 2. – Issue. 3. - P. 259-268. (**Болгарія**).

[9] Оцінка точності нейромережевих метамоделей кругових накладних вихрострумowych перетворювачів [Текст] / Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко, В. В. Тичков, А. В. Сторчак // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2019. – № 2. – С. 18-29.

[10] Multiparameter hybrid neural network metamodel of eddy current probes with volumetric structure of excitation system / R.V. Trembovetska, V.Y. Halchenko, V.V. Tychkov // International Scientific Journal «Mathematical Modeling». – 2019. - vol. 3. - Issue 4. - P. 113-116. (**Болгарія**).

[11] Surface eddy current probes: excitation systems of the optimal electromagnetic field (review) / V.Ya. Halchenko, R.V. Trembovetskaya, V.V. Tychkov // Devices and Methods of Measurements. – 2020, vol. 11, no. 2, pp. 91–104. (**Web of Science**).

[12] Відновлення приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об'єктів при вихрострумowych вимірюваннях із наявністю апріорних даних. Формування вибірки для побудови сурогатної моделі / В.Я. Гальченко, В.В. Тичков, А.В. Сторчак, Р.В. Трембовецька // Український метрологічний журнал. – 2020. – № 1. – С. 35-50. (**Web of Science**).

[13] The Construction of Effective Multidimensional Computer Designs of Experiments Based on a Quasi-random Additive Recursive Rd–sequence / Halchenko

V.Ya., Trembovetska R.V., Tychkov V.V., Storchak A.V. // Applied Computer Systems. – 2020. – vol. 25, no. 1, pp. 70-76. (**Web of Science**).

[14] Методи створення метамоделей: стан питання / В.Я. Гальченко, Р.В. Трембовецька, В.В. Тичков, А.В. Сторчак // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2020. – № 4 (151). - С. 74 – 88.

[15] Створення сурогатної моделі для відновлення приповерхневих профілів електрофізичних характеристик циліндричних об'єктів / В. Я. Гальченко, А. В. Сторчак, Р. В. Трембовецька, В. В. Тичков // Український метрологічний журнал. - 2020. - № 3. – С. 27-35. (**Web of Science**).

[16] Оптимальне проектування вихрострумових перетворювачів та аналіз методів розв'язку нелінійних обернених задач / В.Я. Гальченко, Р.В. Трембовецька, В.В. Тичков // Прикладні питання математичного моделювання. – 2020. – т.3. – № 2.2. – С. 93-104.

[17] Linear Synthesis of Uniform Anaxial Eddy Current Probes with a Volumetric Structure of the Excitation System / R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, V. V. Tychkov, A. V. Storchak // International Journal “NDT Days”. - 2020. – Vol. 3. – Issue. 4. - P. 184-190. (**Болгарія**).

[18] Linear synthesis of frame eddy current probes with a planar excitation system / R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, V. V. Tychkov, S. V. Bazilo // International Scientific Journal «Mathematical Modeling». – 2020. - vol. 4. - Issue 3. – P. 86-90. (**Болгарія**).

[19] Застосування MLP-метамоделей в задачах сурогатної оптимізації [Текст] / Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко, В. В. Тичков // Молодий вчений. — 2018. — №2 (54). – С. 32–39.

[20] Побудова MLP-метамоделі накладного вихрострумового перетворювача для задач сурогатного оптимального синтезу [Текст] / Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко, В. В. Тичков // Технічні вісті. – 2018. – № 1(47), № 2(48). – С. 27-31.

[21] Свідоцтво 102018 України про реєстрацію авторського права на твір “Комп’ютерна програма «Програма створення багатовимірного комп’ютерного однорідного плану експерименту на основі R_d -последовностей»” [Текст] / Гальченко В.Я., Трембовецька Р.В., Тичков В.В. (Україна); заявник та власник Гальченко В.Я., Трембовецька Р.В., Тичков В.В. - №103492; заявл.24.12.20; зареєстровано 25.01.21 в Державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.

[22] Побудова RBF-метамоделей в задачах сурогатної оптимізації [Електронний ресурс] / В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька // Теоретико-практичні проблеми використання математичних методів і комп’ютерно-орієнтованих технологій в освіті та науці : II Всеукраїнська конференція, Київ, 28 березня 2018 р. : матеріали доповідей. – Київ: Київ. ун-т ім. Б. Грінченка, 2018. – С. 179–184.

[23] Визначення впливу плану обчислювального експерименту на ефективність побудови RBF-метамоделей [Електронний ресурс] / Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко, В. В. Тичков // Теоретико-практичні проблеми використання математичних методів і комп’ютерно-орієнтованих технологій в освіті та науці : II Всеукраїнська конференція, Київ, 28 березня 2018 р. : матеріали доповідей. – Київ: Київ. ун-т ім. Б. Грінченка, 2018. – С. 223–228.

[24] Апроксимація поверхні відгуку засобами штучного інтелекту [Текст] / В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, В. В. Тичков // Сучасні тенденції розвитку науки: II Міжнародна науково-практична конференція, Ужгород, 23–24 лютого 2018 р. : матеріали доповідей. — Херсон: Видавничий дім "Гельветика", 2018. — С. 54–57.

[25] Застосування метамоделей для вирішення задач синтезу вихрострумів перетворювачів з однорідним розподілом щільності струму в зоні контролю [Текст] / В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, В. В. Тичков // Приладобудування: стан і перспективи : XVII Міжнародна науково-технічна конференція, 15–16 травня 2018 р. : тези доповідей. — Київ: ПБФ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. — С. 146–147.

[26] Вирішення складних задач оптимізації з використанням метамоделей [Текст] / Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко, В. В. Тичков // Information Technologies in Education, Science and Technology" (ITEST-2018) : IV International Scientific-Practical Conference, Cherkasy, 17–18 May, 2018 : proceedings. — Cherkasy: ChSTU, 2018. — P. 37–42.

[27] The Approximation Surface Review of the Multidimensional Target Function for Surrogate Optimization Problem [Text] / R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, V. V. Tychkov // Advanced Information Systems and Technologies: VI International scientific conference, Sumy, 16–18 May, 2018 : proceedings. — [Edited by S. I. Protsenko, V. V. Shendryk]. — Sumy: Sumy State University, 2018. — P. 34–38.

[28] Метамоделювання як метод проектування вихрострумів перетворювачів з апіорі визначеними властивостями [Текст] / Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко, В. В. Тичков // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: XVIII міжнародна науково-технічна конференція, Одеса, 8–13 червня 2018 р. : матеріали доповідей. — Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2018. — С. 105–107.

[29] Нейромережева метамоделювання циліндричного накладного вихрострумів перетворювача як складова сурогатного оптимального синтезу [Електронний ресурс] / В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, В. В. Тичков // XIX Міжнародна конференція з математичного моделювання (МКММ–2018), Херсон, 17–21 вересня 2018 р. : тези доповідей. — Херсон: ХНТУ, 2018. — С. 8.

[30] Використання цільових функцій-замісників в оптимальному сурогатному синтезі вихрострумів перетворювачів [Текст] / В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, В. В. Тичков // Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики : XXIV Всеукраїнська наукова конференція, Львів, 26–28 вересня 2018 р. : матеріали доповідей. — Львів: Вид-во Тараса Сороки, 2018. — С. 28–34.

[31] Визначення обчислювальної ресурсоемності математичних моделей накладних вихрострумів перетворювачів із врахуванням ефекту швидкості для задач оптимального синтезу [Текст] / [Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко, В. В. Тичков та ін.] // Датчики, прилади та системи–2018 : VII Міжнародна науково-технічна конференція, Черкаси – Херсон – Лазурне, 17–21 вересня 2018 р. : тези доповідей. — Черкаси: видавець ФОП Гордієнко Є.І., 2018. — С. 40–46.

[32] Нейрокомпьютеринг – инструментальное средство проектирования вихретоковых преобразователей [Текст] / [В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецкая, В. В. Тычков и др.] // Проблемы информатики та моделювання (ПІМ–2018) : XVIII Міжнародна конференція, Харків–Одеса, 15–19 вересня 2018 р. : тези конференції. — Харків : НТУ «ХП», 2018. — С. 30.

[33] Побудова нейромережових метамоделей для вирішення зворотних задач реконструкції електрофізичних параметрів циліндричних об'єктів [Електронний ресурс] / [В. О. Діденко, В. В. Тичков, Р. В. Трембовецька, В.Я. Гальченко] // Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно-небезпечних об'єктах : Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених, Харків, 1-2 листопада 2018 р. : матеріали конференції. – Харків : ХНАДУ, 2018. – С. 20-22.

[34] Нейромережеве моделювання в задачах відновлення електрофізичних параметрів циліндричних об'єктів при вихрострумівому контролі [Електронний ресурс] / [А. В. Сторчак, В. В. Тичков, В. Я. Гальченко, Р.В. Трембовецька] // Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно-небезпечних об'єктах : Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених, Харків, 1-2 листопада 2018 р. : матеріали конференції. – Харків : ХНАДУ, 2018. – С. 71-73.

[35] Методи покращення точності нейромережових метамоделей накладних вихрострумівих перетворювачів для сурогатного синтезу [Електронний ресурс] / Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко, В. В. Тичков // Non-Destructive Testing in Context of the Associated Membership of Ukraine in the European Union (NDT-UA 2018) : 2-nd scientific conference with international participation, Poland, Lublin, 15–19 october 2018. : Conference proceedings. – Poland : USNDT, 2018. – № 2. – Р. 47-49.

[36] Побудова математичної моделі прямої задачі в проблемі реконструкції електрофізичних параметрів циліндричних об'єктів контролю вихрострумівим методом [Електронний ресурс] / [А. В. Сторчак, В. В. Тичков, Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко] // Non-Destructive Testing in Context of the Associated Membership of Ukraine in the European Union (NDT-UA 2018) : 2-nd scientific conference with international participation, Poland, Lublin, 15–19 october 2018. : Conference proceedings. – Poland : USNDT, 2018. – № 2. – Р. 50-51.

[37] Сурогатний нелінійний синтез вихрострумівих перетворювачів [Текст] / [Гальченко В.Я., Трембовецька Р.В., Тичков В.В.] // Міжнародний науковий симпозіум «Інтелектуальні рішення». Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи): праці міжнар. наук.-практ. конф., 15-20 квітня 2019 р. Ужгород / М-во освіти і науки України, ДВНЗ «Ужгородський національний університет», та [ін.]. – Ужгород : ПП «Інватор», 2019. - С. 78-80.

[38] Сурогатне моделювання в задачах ідентифікації параметрів об'єктів контролю [Електронний ресурс] / [Гальченко В.Я., Тичков В.В., Трембовецька Р.В., Сторчак А.В.] // Інформатика, математика, автоматика (ІМА-2019) : науково-практична конференція, Суми, 23-26 квітня 2019 р. : матеріали конференції. – Суми: СДУ, 2019 – С. 189.

[39] Розв'язок ресурсоємних обернених задач електротехніки методами сурогатної оптимізації [Електронний ресурс] / [Гальченко В.Я., Трембовецька Р.В., Тичков В.В., Сторчак А.В.] // Фізика, електроніка, електротехніка (ФЕЕ-2019) : науково-практична конференція, Суми, 23-26 квітня 2019 р. : матеріали конференції. – Суми: СДУ, 2019 – С. 135.

[40] Комп'ютерне моделювання вихрострумівого контролю багатошарових циліндричних виробів [Електронний ресурс] / [Сторчак А.В., Трембовецька Р.В.,

Гальченко В.Я., Тичков В.В.] // Обробка сигналів і негаусівських процесів : VII Міжнародної науково-практичної конференції, Черкаси, 23-24 травня 2019 р. : праці конференції. – Черкаси: ЧДТУ, 2019 – С. 179-182.

[41] Постановка проблематики комп'ютерного моделювання вихрострумowego контролю циліндричних провідних виробів [Електронний ресурс] / [Тичков В.В., Трембовецька Р.В., Гальченко В.Я., Сторчак А.В.] // Обробка сигналів і негаусівських процесів : VII Міжнародної науково-практичної конференції, Черкаси, 23-24 травня 2019 р. : праці конференції. – Черкаси: ЧДТУ, 2019 – С. 183-185.

[42] Сурогатне моделювання для розв'язку обернених задач вихрострумowego контролю [Електронний ресурс] / [Трембовецька Р.В., Гальченко В.Я., Тичков В.В.] // Обробка сигналів і негаусівських процесів : VII Міжнародної науково-практичної конференції, Черкаси, 23-24 травня 2019 р. : праці конференції. – Черкаси: ЧДТУ, 2019 – С. 186-187.

[43] Сурогатний параметричний синтез неспіввісних вихрострумowych перетворювачів із рівномірною чутливістю [Електронний ресурс] / В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, В. В. Тичков // XX Міжнародна конференція з математичного моделювання (МКММ–2019), Херсон, 16–20 вересня 2019 р. : тези доповідей. – Херсон: ХНТУ, 2019. – С. 100.

[44] Моделювання вихрострумowego контролю циліндричних виробів із неперервним розподілом електрофізичних параметрів [Text] / Сторчак А.В., Трембовецька Р.В., Гальченко В.Я., Тичков В.В. // Датчики, прилади та системи–2019 : VIII Міжнародна науково-технічна конференція, Черкаси – Херсон – Лазурне, 16–20 вересня 2019 р. : тези доповідей. – Черкаси: видавець ФОП Гордієнко Є.І., 2019. – С. 9–12.

[45] Застосування сурогатної оптимізації в задачах синтезу вихрострумowych давачів [Text] / Трембовецька Р.В., Гальченко В.Я., Тичков В.В. // Датчики, прилади та системи–2019 : VIII Міжнародна науково-технічна конференція, Черкаси – Херсон – Лазурне, 16–20 вересня 2019 р. : тези доповідей. – Черкаси: видавець ФОП Гордієнко Є.І., 2019. – С. 13–17.

[46] Побудова багатопараметрової нейромережевої метамоделі накладних вихрострумowych перетворювачів об'ємної структури / Р.В. Трембовецька, В.Я. Гальченко, В.В. Тичков // III-я науково-технічна конференція з міжнародною участю «Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському Союзі», 17-19 вересня 2019 р. : Збірник матеріалів. Київ, Україна: УТ НКТД, – 2019 – № 3. – С. 19-21.

[47] Аналіз досліджень щодо реконструкції електрофізичних параметрів об'єктів при вихрострумовой контролі / Сторчак А. В., Гальченко В. Я., Тичков В. В., Трембовецька Р. В. // Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно-небезпечних об'єктах : Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених, Харків, 4-5 листопада 2019 р. : матеріали конференції. – Харків : ХНАДУ, 2019. – С. 121-125.

[48] Multiparameter hybrid neural network metamodel of eddy current probes with volumetric structure of excitation system / R.V. Trembovetska, V.Y. Halchenko, V.V. Tychkov // Proceedings of the III International scientific conference «Mathematical modeling». Thematic fields: Theoretical foundations and specificity of mathematical

modelling. Mathematical modelling of technological processes and systems, 11–14.12.2019, Borovets, Bulgaria: Scientific-technical union of Mechanical Engineering - Industry 4.0, Sofia, Bulgaria. – Vol. III. - Issue 1(3)/2019. – P.56-59.

[49] Реконструкція профілів характеристик матеріалу циліндричних об'єктів шляхом розв'язку оберненої задачі вихрострумowego вимірювального контролю / Сторчак А.В., Гальченко В.Я., Трембовецька Р.В., Тичков В.В. // Information Technologies in Education, Science and Technology" (ITEST-2020) : V International Scientific-Practical Conference, Cherkasy, May 21-23, 2020. – Cherkasy: ChSTU, 2020. – С. 34-36.

[50] Побудова ефективних багатовимірних комп'ютерних планів експерименту / Гальченко В.Я., Трембовецька Р.В., Тичков В.В., Сторчак А.В. // Information Technologies in Education, Science and Technology" (ITEST-2020) : V International Scientific-Practical Conference, Cherkasy, May 21-23, 2020. – Cherkasy: ChSTU, 2020. – С. 116-121.

[51] Методи побудови метамоделей для сурогатної оптимізації [Електронний ресурс] / [Трембовецька Р.В., Гальченко В.Я., Тичков В.В., Сторчак А.В.] // Інформатика, математика, автоматика (ІМА-2020) : науково-практична конференція, Суми, 20-24 квітня 2020 р. : матеріали конференції. – Суми: СДУ, 2020. – С. 243-244.

[52] Ідентифікація електрофізичних характеристик об'єктів із використанням «м'яких обчислень» [Електронний ресурс] / [Тичков В.В., Сторчак А.В., Гальченко В.Я., Трембовецька Р.В.] // Фізика, електроніка, електротехніка (ФЕЕ-2020) : науково-практична конференція, Суми, 20-24 квітня 2020 р. : матеріали конференції. – Суми: СДУ, 2020. – С. 143-144.

[53] Аналіз методів розв'язку нелінійних обернених задач та їх застосування до проектування вихрострумowych перетворювачів / В.Я. Гальченко, Р.В. Трембовецька, В.В. Тичков, А.В. Сторчак // XXI Міжнародна конференція з математичного моделювання (МКММ–2020), Херсон, 14–18 вересня 2020 р. : тези доповідей. – Херсон: ХНТУ, 2020. – С. 44.

[54] Синтез об'ємних структур системи збудження вихрострумowych перетворювачів [Електронний ресурс] / Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко, В. В. Тичков, А. В. Сторчак // Матеріали XV міжнародної конференції "Контроль і управління в складних системах (КУСС-2020)", м. Вінниця, 8-10 жовтня 2020 р.– Електрон. текст. дані. – Вінниця : ВНТУ, 2020.

[55] Інверсія штучних нейронних мереж в обернених задачах вихрострумовой структуроскопії [Електронний ресурс] / А. В. Сторчак, В. Я. Гальченко, В. В. Тичков, Р. В. Трембовецька // Матеріали XV міжнародної конференції "Контроль і управління в складних системах (КУСС-2020)", м. Вінниця, 8-10 жовтня 2020 р.– Електрон. текст. дані. – Вінниця : ВНТУ, 2020.

[56] Застосування нейромережі з «тандем»-архітектурою для розв'язку оберненої задачі при вихрострумowym вимірювальному контролі / В. В. Тичков, А. В. Сторчак, В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька // Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві : Міжнародна науково-практична on-line конференція, Кропивницький, 11-12 листопада 2020 р. – збірник тез доповідей. – Кропивницький : КНТУ, 2020. – С. 148-150.

[57] Linear synthesis of frame eddy current probes with a planar excitation system / R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, V. V. Tychkov, C. V. Bazilo // Proceedings of the IV International scientific conference «Mathematical modeling». Thematic fields: Theoretical foundations and specificity of mathematical modelling. Mathematical modelling of technological processes and systems, 9–12.12.2020, Borovets, Bulgaria: Scientific-technical union of Mechanical Engineering - Industry 4.0, Sofia, Bulgaria. – Vol. IV. - Issue 1(4)/2020. – P. 20-24.

АНОТАЦІЯ

Трембовецка Р.В. Теорія оптимального синтезу накладних вихрострумів перетворювачів для комп'ютерних систем неруйнівного контролю. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Черкаський державний технологічний університет Міністерства освіти і науки України, Черкаси, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми створення теорії оптимального параметричного синтезу всього класу рухомих накладних вихрострумів перетворювачів з однорідною чутливістю в зоні контролю для забезпечення необхідних умов щодо ідентифікації дефектів порушень суцільності матеріалів й виробів при використанні комп'ютерних систем неруйнівного контролю.

Розроблено єдину методологію сурогатного оптимального синтезу всього класу рухомих вихрострумів перетворювачів із однорідною чутливістю в зоні контролю, що включає в себе зокрема створений метод побудови багатовимірних однорідних комп'ютерних планів експериментів з гарантовано низькими показниками центрованої та циклічної розбіжностей на основі комбінацій квазівипадкових R_d -послідовностей; побудований адитивний комітетний нейромережевий метод побудови багатовимірних метамоделей вихрострумів перетворювачів. В рамках запропонованого єдиного методологічного підходу створено багатовимірні нейромережеві метамоделі рухомих кругових та різновидів рамкових накладних вихрострумів перетворювачів з планарними та об'ємними структурами систем збудження, що мають прийнятну точність апроксимації багатовимірних поверхонь відгуку. Запропоновано методи оптимального синтезу різних типів рухомих накладних вихрострумів перетворювачів із однорідною чутливістю до дефектів з планарними та об'ємними структурами систем збудження.

Ключові слова: комп'ютерна система неруйнівного контролю, ефект швидкості, накладний вихрострумів перетворювач, однорідна чутливість, розподіл густини вихрових струмів, метамоделі, сурогатний оптимальний синтез.

АННОТАЦИЯ

Трембовецкая Р.В. Теория оптимального синтеза накладных вихретоковых преобразователей для компьютерных систем неразрушающего контроля. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. – Черкасский государственный технологический университет Министерства образования и науки Украины, Черкассы, 2021.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы создания теории оптимального параметрического синтеза всего класса движущихся накладных вихретоковых преобразователей с однородной чувствительностью в зоне контроля по обеспечению необходимых условий для идентификации дефектов нарушений сплошности материалов и изделий при использовании компьютерных систем неразрушающего контроля.

Разработана единая методология суррогатного оптимального синтеза всего класса движущихся вихретоковых преобразователей с однородной чувствительностью в зоне контроля, которая включает в себя в частности созданный метод построения многомерных однородных компьютерных планов экспериментов с гарантированно низкими показателями центрированного и циклического расхождений на основе комбинаций квазислучайных R_d - последовательностей; разработанный аддитивный комитетный нейросетевой метод построения многомерных метамоделей вихретоковых преобразователей. В рамках предложенного единого методологического подхода созданы многомерные нейросетевые метамоделей движущихся круговых и разновидностей рамочных накладных вихретоковых преобразователей с планарными и объемными структурами систем возбуждения, характеризующихся приемлемой точностью аппроксимации многомерных поверхностей отклика. Предложены методы оптимального синтеза разных типов движущихся накладных вихретоковых преобразователей с однородной чувствительностью к дефектам с планарными и объемными структурами систем возбуждения.

Ключевые слова: компьютерная система неразрушающего контроля, эффект скорости, накладной вихретоковый преобразователь, однородная чувствительность, распределение плотности вихревых токов, метамоделей, суррогатный оптимальный синтез.

ANNOTATION

Trembovetska R.V. Theory of optimal synthesis of surface eddy current probes for computer systems of non-destructive testing. – Manuscript.

The dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.13.05 – Computer Systems and Components. – Cherkasy State Technological University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Cherkasy, 2021.

The dissertation thesis is devoted to solving the urgent scientific and applied problem of creating a theory of optimal parametric synthesis of the entire class of moving surface eddy current probes with the uniform sensitivity in the testing zone to ensure the necessary conditions for identifying defects in the continuity of materials and products when using computer systems for non-destructive testing.

The introduction studies the essence and state of the scientific problem, substantiates the relevance of the dissertation, formulates the purpose and objectives of the research,

reveals the scientific novelty and practical value of the results, provides data on publications and testing of the work.

The first section analyzes the scientific and applied problem, studies the current state of development of computer systems of non-destructive electromagnetic testing. Based on the analysis of the computer systems of non-destructive testing, it was determined that their integral component, on which the efficiency of the systems as a whole depends on the detection and identification of defects in the integrity of products and materials, are eddy current probes, in particular surface. The section systematizes and critically analyzes certain ideas, approaches and methods known from scientific and technical sources of information to create excitation system of eddy current probes, which implement a homogeneous eddy currents density distribution in the testing object area. This section provides an overview of the available mathematical methods for solving incorrectly posed problems of this type. As a result of the analysis it is established that the optimization method is perspective among modern approaches. Methods of creating metamodels for use in optimal surrogate synthesis of eddy current probes are considered. The most perspective tendencies of their development and application are determined. In addition, the section on the basis of the analysis formulates the purpose of the dissertation research, sets a number of tasks, the implementation of which ensures its achievement.

In the second section the conceptual statement of a scientific and technical problem is applied. The section proposes a methodology for surrogate optimal synthesis of the whole class of movable eddy current probes with the uniform sensitivity in the testing zone. As an example, the generalized for circular and frame excitation systems "exact" electrodynamic model of eddy current probes is given. The methods for generating multidimensional homogeneous computer designs of experiments are considered. The created additive committee neural network method of construction of multidimensional eddy current probes metamodels is presented. The approaches of the final estimation of adequacy and informativeness of the received metamodels on a set of statistical indicators are shown. This section also presents possible variants of approximation functions of multidimensional response surfaces for a number of varieties of excitation systems of eddy current probes structures.

The third section considers the creation of methods for optimal surrogate synthesis of circular movable surface eddy current probes with planar and volumetric excitation systems structures, providing a uniform sensitivity to defects, which is a necessary condition for recognizing defects of integrity in computer quality testing systems. These methods have been developed within the framework of a single methodology for optimal synthesis of the whole class of movable eddy current probes, which is proposed in Section 2. The construction of metamodels of excitation systems of surface eddy current probes was carried out; their adequacy was evaluated according to a number of statistical indicators. Numerical results of parametric optimal surrogate synthesis of excitation systems of surface eddy current probes with circular planar and volumetric structures are given.

The fourth section presents the method of optimal surrogate synthesis of frame movable surface eddy current probes with a planar excitation systems structure, created on the basis of the proposed unified methodological approach to the synthesis of movable eddy current probes. The metamodel excitation system of surface eddy current probe has been constructed. As a result of conditional optimization with the use of the created metamodel

the variants of designs of movable square surface eddy current probes with planar excitation systems structure have been synthesized. The synthesized variants have showed better results in terms of homogeneity of eddy currents density distribution in comparison with the classical surface eddy current probe with excitation system in the form of a single square coil.

The fifth section presents a method of optimal surrogate synthesis of tangential frame movable surface eddy current probes with a volumetric excitation systems structure, created in accordance with the proposed unified methodological approach to the synthesis of movable eddy current probes. Possible variants of constructions of tangential surface eddy current probes differing in the location of the measuring coil of the probe are considered. The excitation system metamodel of the tangential surface eddy current probe has been built, its adequacy was evaluated according to a number of statistical indicators. Numerical results of parametric optimal surrogate synthesis of excitation systems of tangential surface eddy current probes with volumetric excitation system structure are presented.

The sixth section offers a number of possible approaches to the practical implementation of excitation systems synthesized surface eddy current probes. The errors of all methods of leveling distortions of eddy currents density distribution in the manufacture of a specific variant of the synthesized surface eddy current probe in practice have been estimated.

The main results of the dissertation research are formulated in the conclusions.

The appendices contain acts on the practical implementation of the results of the dissertation; a four-dimensional homogeneous computer plan of the experiment based on R_d -sequences for the construction of a metamodel of a circular surface eddy current probe with a volumetric structure of the excitation system in the decomposition subdomain; three-dimensional homogeneous computer design of the experiment based on LP_τ -sequences for construction of a metamodel of a frame surface eddy current probe with a planar structure of the excitation system in the decomposition subdomain; the weight coefficients of the RBF-neural network of the last level of an additive regression of the hypersurface response in the corresponding decomposition subdomain for the metamodel of the frame surface eddy current probe with a planar structure of the excitation system.

Keywords: computer system of non-destructive testing, velocity effect, surface eddy current probe, uniform sensitivity, eddy current density distribution, metamodel, surrogate optimal synthesis.