

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора

Ситнікова Валерія Степановича

на дисертаційну роботу

Трембовецької Руслани Володимирівни

«Теорія оптимального синтезу накладних вихрострумівих перетворювачів для комп'ютерних систем неруйнівного контролю»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю
05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти

Актуальність теми дисертації

Різноманітні галузі важкого машинобудування, підприємства чорної металургії використовують при контролі якості продукції автоматизовані системи неруйнівного контролю в «поточці». Значних успіхів в забезпеченні якості продукції досягнуто із використанням комп'ютерних систем неруйнівного контролю, до складу яких входять різноманітні засоби контролю, зокрема і вихрострумівих перетворювачі.

Повсякчас вимоги до систем неруйнівного контролю все ускладнюються, і наразі актуальним є не лише виявлення дефектів, а значно складніше завдання – це встановлення їх форми, допустимих розмірів, прийнятності структурних відхилень.

Ефективне виконання ідентифікації дефектів значно скорочує відсоток браку 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 неможлива без перетворювачів із досконалими характеристиками, рівень проектування яких напряму залежить від розвитку обчислювальної техніки, новими можливостями математичного апарату та програмного забезпечення.

Наявні класичні конструкції вихрострумівих перетворювачів що використовуються в автоматизованому контролі не задовольняють зростаючим вимогам до засобів неруйнівного контролю, що призводить до необхідності їх вдосконалення, а саме є необхідність створення вихрострумівих перетворювачів із покращеною характеристикою чутливості до дефектів. Тобто очевидна наявна



науково-технічна проблема, вирішення якої сприяє ефективному розв'язку задач дефектометрії.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій

Сформульовані мета та задачі досліджень вірно показують суть проблеми забезпечення необхідних умов щодо ідентифікації дефектів порушень суцільності матеріалів і виробів при використанні вихрострумівих перетворювачів в комп'ютерних системах неруйнівного контролю.

Внаслідок коректного використання наукових методів отримані результати, представлені автором дисертаційної роботи, наукові положення, висновки та рекомендації достатньо обґрунтовані. Постановка задач дослідження виконана аргументовано та переконливо.

У вступі автором розкрита суть та стан наукової проблеми, обґрунтовано її актуальність, сформульовано мету та завдання досліджень, розкрито наукову новизну та практичну значущість, наведено інформацію стосовно апробації та публікації за темою дисертації.

У **першому** розділі автором здійснено аналіз науково-прикладної проблеми, вивчено сучасний стан розвитку комп'ютерних систем неруйнівного електромагнітного контролю. Встановлено, що невіддільним компонентом від якого багато в чому залежить ефективність роботи комп'ютерних систем в цілому є вихроструміві перетворювачі зокрема накладні. Автором здійснено критичний аналіз відомих методів та підходів щодо створення систем збудження вихрострумівих перетворювачів, які забезпечують однорідний розподіл густини вихрових струмів в зоні контролю об'єкта. Також наведено огляд відомих математичних методів розв'язку некоректно поставлених задач та встановлено доцільний метод їх розв'язку. Розглянуто відомі методи створення метамоделей, які можна використовувати при оптимальному синтезі вихрострумівих перетворювачів.

Ґрунтуючись на проведеному аналізі сформульована мета дисертаційного дослідження та поставлено низку завдань, виконання яких забезпечує досягнення мети.

У **другому розділі** виконано концептуальну постановку науково-технічної проблеми. В розділі побудована методологія сурогатного оптимального синтезу всього класу рухомих вихрострумівих перетворювачів із однорідною чутливістю в зоні контролю, що містить сукупність методів: метод створення «точної»

електродинамічної моделі взаємодії системи збудження вихрострумowego перетворювача з об'єктом контролю; 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 метамodelей систем збудження вихрострумowych перетворювачів; методів пошуку глобальних екстремумів цільової функції засобами умовної стохастичної метаевристичної оптимізації; методу остаточної оцінки похибки синтезу бажаного розподілу густини вихрових струмів за «точною» електродинамічною моделлю.

У **третьому** розділі створено методи оптимального сурогатного синтезу кругових рухомих накладних вихрострумowych перетворювачів із планарною та об'ємною структурами систем збудження, які розроблено в рамках запропонованої єдиної методології. Автором побудовані метамodelей систем збудження, які мають високу обчислювальну продуктивність, що дозволило здійснити параметричний сурогатний синтез систем збудження накладних вихрострумowych перетворювачів з круговою планарною та об'ємною структурами.

В **четвертому** розділі створено метод оптимального сурогатного синтезу рамкових рухомих накладних вихрострумowych перетворювачів з планарною структурою системи збудження також на основі запропонованого єдиному методологічного підходу. Для реалізації цього методу попередньо створена адекватна метамodelей системи збудження з високою обчислювальною продуктивністю менше ніж 2 с для розрахунку в одній контрольній точці. Із застосуванням створеної метамodelей здійснена умовна оптимізація. Отримані синтезовані варіанти систем збудження показали кращі результати щодо забезпечення умови однорідності розподілу густини вихрових струмів у порівнянні із класичним аналогом у вигляді одинарного витка.

В **п'ятому** розділі відповідно до запропонованої єдиною методології створено метод оптимального сурогатного синтезу тангенціальних рамкових рухомих накладних вихрострумowych перетворювачів із об'ємною структурою системи збудження. Створена метамodelей цього перетворювача, яка має прийнятну точність та менше ніж 1 с час розрахунку однієї контрольної точки, що дозволяє реалізувати метод оптимального синтезу.

У **шостому** розділі запропоновано декілька можливих підходів практичної реалізації систем збудження синтезованих накладних вихрострумowych

перетворювачів. Оцінено для кожного із запропонованих підходів похибку спотворення розподілу густини вихрових струмів.

У додатках наведено акти про практичне впровадження результатів дисертаційної роботи; чотиривимірний однорідний комп'ютерний план експерименту на основі R_d -послідовностей для побудови метамоделі кругового накладного вихрострумowego перетворювача з об'ємною структурою системи збудження у декомпозиційній підобласті; тривимірний однорідний комп'ютерний план експерименту на основі LP_r -послідовностей для побудови метамоделі рамкового накладного вихрострумowego перетворювача з планарною структурою системи збудження у декомпозиційній підобласті; вагові коефіцієнти RBF-нейронної мережі останнього рівня адитивної регресії гіперповерхні відгуку у відповідній декомпозиційній підобласті для метамоделі рамкового накладного вихрострумowego перетворювача з планарною структурою системи збудження.

У роботі автор грамотно використовує теорію електромагнітного поля, теорію диференціальних та інтегральних рівнянь, евристичні методи побудови метамоделей засобами штучних нейронних мереж, методи математичної статистики для оцінки адекватності та інформативності метамоделей, теорію планування експерименту, теорію обернених задач, теорію оптимізації.

Все це дозволяє вважати наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи достатньо обґрунтованими і достовірними.

Основні результати досліджень та їх наукова новизна

У результаті досліджень автором отримані наступні наукові результати:

1. вперше розроблена методологія сурогатного оптимального синтезу всього класу рухомих вихрострумowych перетворювачів із однорідною чутливістю в зоні контролю, що включає 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 вихрострумowych перетворювачів. Методологія дозволяє створити нові методи оптимального сурогатного синтезу рухомих накладних вихрострумowych 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 вихрострумowych 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 апіорі заданий розподіл густини вихрових струмів в об'єкті.

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

4. вперше створено багатовимірну нейромережеву метамодель рамкового рухомого тангенціального накладного вихрострумового перетворювача з об'ємною структурою системи збудження, який є ефективним для ідентифікації дефектів типу розшарувань комп'ютерними системами електромагнітного неруйнівного контролю. Метамодель 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 вихрострумових 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 вихрострумових перетворювачів з планарною структурою систем збудження, який дозволяє реалізувати однорідну чутливість перетворювачів в зоні контролю;

7. вперше створено метод синтезу рамкових рухомих тангенціальних накладних вихрострумових 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 отриманих результатів

Практична значущість отриманих результатів полягає в наступному:

1. Розширена науково-технічна база проектування рухомих вихрострумових 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.

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 оснований 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.

Практична значущість отриманих результатів підтверджується їх використанням при виконанні НДР та впровадженням теоретичних і практичних результатів в навчальний процес, зокрема, при читанні лекцій, проведенні лабораторних та практичних занять, виконанні курсових проєктів та кваліфікаційних робіт з дисциплін «Оптимізація прийняття рішень у техніці», «Математичні методи оптимізації та моделювання систем і процесів», «Випробування та контроль якості продукції», «Аналіз та контроль матеріалів», «Системи технічної діагностики та контролю якості продукції», «Планування та моделювання комп'ютерного експерименту».

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана у межах ініціативної науково-дослідної роботи за темою «Обернені задачі вихрострумівого контролю: моделі, алгоритми, методи оптимізації», номер держреєстрації №0120U103875 на кафедрі приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій.

Публікації за темою дисертації

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, виконаною і оформленою згідно вимог.

Дисертаційна робота написана зрозуміло, структура роботи логічна.

Наукові публікації дисертанта в цілому повно відображають зміст дисертації. Результати дисертаційних досліджень опубліковані 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.

Загальна кількість друкованих робіт та якість апробованого в них матеріалу відповідає вимогам МОН України щодо публікації основного змісту дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Структура і зміст автореферату повністю відбиває результати досліджень, які подані в дисертації

Недоліки та зауваження до роботи

1. Автором роботи у пунктах практичної цінності не представлено чисельні показники технічних переваг отриманих результатів, що не дозволяє сповна оцінити їх ефективність
2. При побудові метамоделей різновидів систем збудження накладних вихрострумів перетворювачів застосовується запропонований автором гібридний підхід. При цьому не окреслено для кожного випадку чим обумовлено розбиття області пошуку на ту чи іншу кількість декомпозиційних підобластей.
3. Також не зазначено критерій вибору для адитивної нейромережевої регресії кількості її проміжних рівнів.
4. В розділах 3, 4, 5 здійснюється верифікація створених метамоделей, але чітко не вказано критерій вибору кількості точок для її здійснення.
5. При створенні метамоделей використовуються RBF-нейронні мережі, для яких також не зазначено, як вибирається мінімальна та максимальна кількість прихованих нейронів.
6. В роботі не наведено умови за яких припиняється процедура навчання нейронної мережі у випадку її перенавчання.

7. Верифікація отриманих метамоделей для певних зрізів гіперповерхні відгуку здійснюється за допомогою формули, яка описує вихід нейронної мережі. Нажаль автор показав цю формулу тільки у загальному випадку, а для конкретних випадків систем збудження із врахуванням отриманих вагових коефіцієнтів нейронної мережі не наведено. Це значно покращило б сприйняття та дало б уявлення про цей алгоритм відновлення гіперповерхні відгуку.

Вказані недоліки не знижують отриманих автором результатів та не мають вирішального впливу на наукову та практичну значущість дисертаційної роботи.

Загальні висновки

Дисертаційна робота Трембовецької Р.В. є завершеною науковою працею, в якій отримані нові наукові результати, що в сукупності забезпечують вирішення науково-прикладної проблеми, яка полягає в створенні теорії оптимального параметричного синтезу всього класу рухомих вихрострумівих перетворювачів, що дозволяє проектувати вихроструміві перетворювачі із однорідною чутливістю в зоні контролю, а це своєю чергою забезпечує необхідні умови щодо ідентифікації дефектів порушень суцільності матеріалів і виробів при використанні таких перетворювачів в комп'ютерних систем неруйнівного контролю.

Дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти.

На підставі проведеного аналізу дисертаційної роботи можна зробити висновок про те, що за актуальністю, науковим рівнем, отриманими науковими результатами та практичною цінністю робота відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою КМУ «567 від 24.07.2013 р., а її автор Трембовецька Руслана Володимирівна заслуговує на присвоєння наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри комп'ютерних систем
Державного університету «Одеська політехніка»
д-р техн. наук, професор



В.С. Ситніков

Підпис професора Ситнікова В.С. засвідчую



Трембовецька Р.В.



Д.В. Дмитрішук