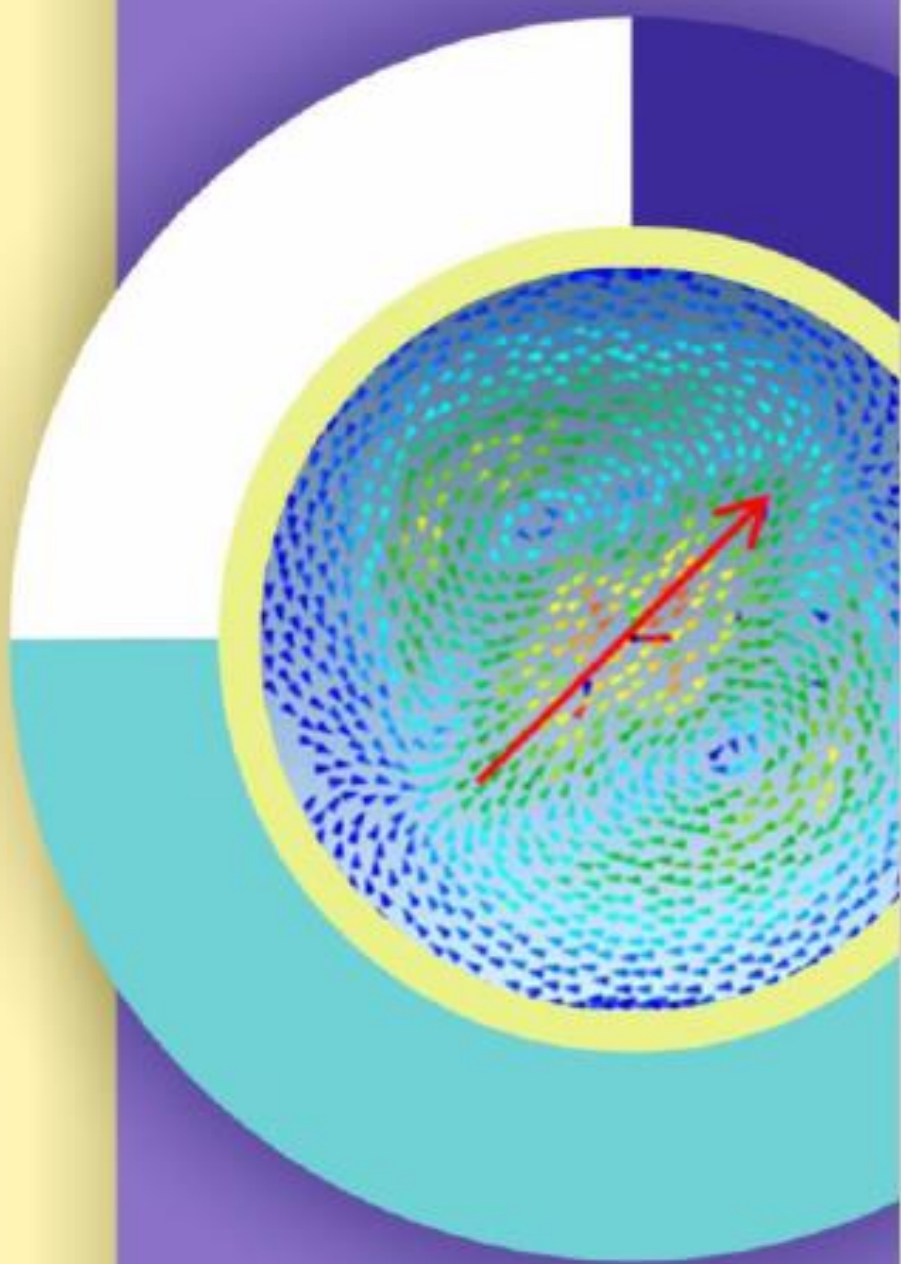


**НАКЛАДНІ ВИХРОСТРУМОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ  
З ОДНОРІДНОЮ ЧУТЛИВІСТЮ**

**В. Я. ГАЛЬЧЕНКО  
Р. В. ТРЕМБОВЕЦЬКА  
В. В. ТИЧКОВ**



УДК 620.179.147:620.186:519.853] (02)

Г17

*Рекомендовано до друку Вченою радою Черкаського державного технологічного університету Міністерства освіти і науки України, протокол №1 від 28.08.2021 р.*

**Р е ц е н з е н т и :**

**Кошовий М.Д.**, професор кафедри інтелектуальних вимірвальних систем та інженерії якості Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки

**Куц Ю.В.**, професор кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доктор технічних наук, професор

**Хандецький В.С.**, завідувач кафедри електронних обчислювальних машин Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, доктор технічних наук, професор

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

Г17 **Накладні вихрострумові перетворювачі з однорідною чутливістю:**  
монографія / В.Я.Гальченко, Р.В.Трембовецька, В.В.Тичков. – Харків:  
СГ НТМ «Новий курс», 2021. – 281 с.

ISBN 978-617-7886-28-9

Монографія присвячена створенню теорії сурогатного оптимального синтезу рухомих вихрострумових перетворювачів із однорідною чутливістю до дефектів порушень суцільності матеріалів і виробів. Запропонована єдина методологія, яка дозволяє реалізувати сурогатний оптимальний синтез всього класу накладних вихрострумових перетворювачів із апіорі заданою однорідною чутливістю в зоні контролю. Розроблені практичні підходи до створення багатовимірних метамоделей рухомих перетворювачів, засоби перевірки їх адекватності та інформативності, що ґрунтуються на перевірці статистичних гіпотез. Для побудови метамоделей застосовувалися створені багатовимірні плани комп'ютерних однорідних експериментів на основі  $R_d$ -послідовностей та  $LP_r$ -послідовностей Соболя, які характеризуються гарантовано низькими показниками розбіжностей. Використання метамоделей дозволило реалізувати процедури сурогатного оптимального синтезу перетворювачів із застосуванням сучасних стохастичних метаевристичних алгоритмів глобального пошуку екстремумів. Наведено програми реалізації комп'ютерних планів експериментів, алгоритмів умовної оптимізації, що забезпечують виконання синтезу вихрострумових перетворювачів із однорідною чутливістю до дефектів.

Для наукових співробітників та інженерів, що працюють в галузі вихрострумового неруйнівного контролю, а також для аспірантів і студентів відповідних спеціальностей.

УДК 620.179.147:620.186:519.853] (02)

ISBN 978-617-7886-28-9

© Гальченко В.Я., 2021

© ЧДТУ, 2021

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	7
ПЕРЕДМОВА.....	8
ГЛАВА 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕНДЕНЦІЙ, НАПРЯМКІВ ТА МЕТОДІВ ПРОЄКТУВАННЯ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ІЗ ПРОСТОРОВО- ІНВАРІАНТНИМИ ПОЛЯМИ ЗБУДЖЕННЯ.....	12
1.1. Аналіз методів та тенденцій щодо створення вихрострумівих перетворювачів із системами збудження оптимального електромагнітного поля .....	13
1.2. Методи розв'язку нелінійних обернених задач та оцінка можливості їх застосування для оптимального синтезу вихрострумівих перетворювачів.....	30
1.3. Методи створення моделей-замісників для ресурсомістких задач сурогатного оптимального синтезу вихрострумівих перетворювачів з апріорі заданими властивостями поля зондування.....	36
Список використаних джерел до глави 1.....	56
ГЛАВА 2. СТВОРЕННЯ МЕТОДОЛОГІЇ СУРОГАТНОГО ОПТИМАЛЬНОГО ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ РУХОМИХ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ОДНОРІДНОЮ ЧУТЛИВІСТЮ В ЗОНІ КОНТРОЛЮ.....	64
2.1. Постановка проблеми оптимального синтезу рухомих вихрострумівих перетворювачів із просторово-інваріантними полями збудження.....	64
2.2. Розв'язок прямої електродинамічної задачі щодо взаємодії електромагнітного поля збудження з об'єктом контролю з урахуванням ефекту швидкості.....	69
2.3. Побудова метамоделей рухомих вихрострумівих перетворювачів для задач оптимального сурогатного синтезу їх систем збудження з забезпеченням однорідного розподілу густини вихрових струмів в об'єкті контролю.....	77
2.3.1. Створення методу побудови багатовимірних однорідних комп'ютерних планів експерименту з високими показниками гомогенності для використання в задачах апроксимації гіперповерхонь відгуку.....	77

2.3.2. Створення методу побудови багатовимірних комітетних адитивних нейромережових метамоделей вихрострумових перетворювачів.....	92
2.3.3. Перевірка адекватності та інформативності метамоделей рухомих вихрострумових перетворювачів.....	96
2.4. Оптимізаційні алгоритми пошуку глобального екстремуму в задачах синтезу рухомих вихрострумових перетворювачів.....	98
2.4.1. Стохастичні метаевристичні методи розв'язку задач глобальної оптимізації.....	100
2.4.2. Алгоритм оптимізації роєм частинок PSO зі стратегією випадкової топології зв'язків.....	101
2.4.3. Гібридний меметичний алгоритм оптимізації на основі генетичного з локальним пошуком симплексним методом Нелдера-Міда .....	105
2.4.4. Гібридний алгоритм оптимізації роєм частинок з еволюційним формуванням складу рою.....	107
2.5. Верифікація результатів синтезу систем збудження рухомих вихрострумових перетворювачів з використанням “точних” математичних моделей.....	108
Список використаних джерел до глави 2.....	109
<b>ГЛАВА 3. МЕТОД СУРОГАТНОГО ОПТИМАЛЬНОГО ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ КРУГОВИХ РУХОМИХ НАКЛАДНИХ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ.....</b>	<b>116</b>
3.1. «Точна» електродинамічна модель рухомих кругових накладних вихрострумових перетворювачів.....	116
3.2. Побудова метамоделей кругових накладних вихрострумових перетворювачів.....	122
3.2.1. Метамодель кругового накладного вихрострумового перетворювача із планарною структурою системи збудження і перевірка її адекватності та інформативності.....	123
3.2.2. Метамодель кругового накладного вихрострумового перетворювача із об'ємною структурою системи збудження і перевірка її адекватності та інформативності.....	135
3.3. Суругатний параметричний оптимальний синтез систем збудження кругових накладних вихрострумових перетворювачів...	148
3.3.1. Суругатний синтез накладних вихрострумових перетворювачів з планарною структурою системи збудження та верифікація результатів синтезу .....	148

3.3.2. Суругатний синтез накладних вихрострумів перетворювачів з об'ємною структурою системи збудження та верифікація результатів синтезу.....	151
Список використаних джерел до глави 3.....	156
<b>ГЛАВА 4. МЕТОД СУРОГАТНОГО ОПТИМАЛЬНОГО ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ РАМКОВИХ РУХОМИХ НАКЛАДНИХ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ.....</b>	<b>159</b>
4.1. «Точна» електродинамічна модель рухомих рамкових накладних вихрострумів перетворювачів .....	159
4.2. Побудова метамоделі рамкового рухомого накладного вихрострумів перетворювача з планарною структурою системи збудження і перевірка її адекватності та інформативності.....	165
4.3. Суругатний оптимальний параметричний синтез систем збудження рамкових накладних вихрострумів перетворювачів та верифікація результатів синтезу.....	174
Список використаних джерел до глави 4.....	180
<b>ГЛАВА 5. МЕТОД СУРОГАТНОГО ПАРАМЕТРИЧНОГО ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗУ РАМКОВИХ РУХОМИХ ТАНГЕНЦІАЛЬНИХ НАКЛАДНИХ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ.....</b>	<b>183</b>
5.1. «Точна» електродинамічна модель рамкових рухомих тангенціальних накладних вихрострумів перетворювачів.....	183
5.2. Варіанти конструкцій тангенціальних накладних вихрострумів перетворювачів.....	189
5.3. Побудова метамоделі рамкового тангенціального накладного вихрострумів перетворювача з об'ємною структурою системи збудження і перевірка її адекватності та інформативності.....	193
5.4. Суругатний оптимальний синтез систем збудження рамкових тангенціальних накладних вихрострумів перетворювачів та верифікація результатів синтезу.....	201
Список використаних джерел до глави 5.....	210
<b>ГЛАВА 6. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИНТЕЗОВАНИХ СИСТЕМ ЗБУДЖЕННЯ НАКЛАДНИХ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ.....</b>	<b>212</b>
6.1. Варіанти практичної реалізації синтезованих систем збудження накладних вихрострумів перетворювачів та оцінка точності відтворення синтезованого розподілу густини вихрових струмів в об'єкті контролю.....	212

ЗАКЛЮЧЕННЯ.....	215
ДОДАТКИ.....	216
Додаток А. Програма створення багатовимірних комп'ютерних однорідних планів експериментів на основі $R_d$ -послідовностей.....	217
Додаток Б. Програма створення багатовимірних комп'ютерних однорідних планів експериментів на основі $ЛП_\tau$ -послідовностей Соболя.....	224
Додаток В. Програма реалізації генетичного алгоритму оптимізації	229
Додаток Г. Програма реалізації алгоритму оптимізації роєм частинок PSO із випадковою динамічною змінною топологією зв'язків.....	231
Додаток Д. Програма реалізації гібридного алгоритму оптимізації на основі генетичного алгоритму з локальним пошуком методом Нелдера-Міда .....	235
Додаток Е. Приклад чотиривимірного однорідного комп'ютерного плану експерименту на основі $R_d$ -послідовностей для побудови метамоделі кругового накладного вихрострумowego перетворювача з об'ємною структурою системи збудження .....	238
Додаток Ж. Приклад тривимірного однорідного комп'ютерного плану експерименту на основі $ЛП_\tau$ -послідовностей для побудови метамоделі рамкового накладного вихрострумowego перетворювача з планарною структурою системи збудження .....	252
Додаток З. Вагові коефіцієнти RBF-нейронної мережі метамоделі, отриманої в результаті адитивної регресії гіперповерхні відгуку для рамкового накладного вихрострумowego перетворювача з планарною структурою системи збудження.....	260
ОСНОВНІ ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ.....	279
ПЕРЕЛІК ДСТУ ТА СТАНДАРТІВ ISO В ГАЛУЗІ ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ.....	280

## ПЕРЕДМОВА

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 (НК) в «потоці», коли об'єкт переміщується з певною швидкістю. Значні успіхи в забезпеченні необхідного рівня якості продукції останнім часом досягнуто використанням комп'ютеризованих систем неруйнівного контролю, зокрема електромагнітного із застосуванням накладних вихрострумівих перетворювачів (НВСП). Сучасні вимоги до систем НК 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 вихрострумівих перетворювачів (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. та інші. 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 використані 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 ВСП з однорідною чутливістю в зоні контролю для забезпечення необхідних умов щодо ідентифікації дефектів порушень суцільності матеріалів й виробів при використанні комп'ютеризованих систем неруйнівного контролю.

У *першій главі* проведено аналіз науково-прикладної проблеми, вивчено сучасний стан розвитку комп'ютеризованих систем неруйнівного електромагнітного контролю. На основі аналізу комп'ютеризованих систем неруйнівного контролю визначено, що їх невіддільним компонентом, від якого значною мірою залежить ефективність роботи систем в цілому щодо виявлення та ідентифікації дефектів суцільності виробів і матеріалів, є вихроструміві перетворювачі, зокрема накладні. У цій главі проведено систематизацію та критичний аналіз відомих з науково-технічних джерел інформації певних ідей, підходів та методів до створення систем збудження вихрострумівих перетворювачів, які реалізують однорідний розподіл густини вихрових струмів в зоні контролю об'єкта. Тут наведено огляд відомих математичних методів розв'язку некоректно поставлених задач даного типу. В результаті аналізу встановлено, що серед сучасних підходів перспективним є оптимізаційний метод. Розглянуто методи створення метамоделей для використання при оптимальному сурогатному синтезі вихрострумівих перетворювачів. Визначено найперспективніші тенденції їх розвитку та застосування.

У *другій главі* виконано концептуальну постановку науково-технічної проблеми та запропонована методологія сурогатного оптимального синтезу всього класу рухомих вихрострумівих перетворювачів із однорідною чутливістю в зоні контролю. Як приклад, наведено узагальнену для кругових та рамкових систем збудження «точну» електродинамічну модель вихрострумівих перетворювачів. Розглянуто методи генерування



багатовимірних однорідних комп'ютерних планів експериментів. Представлено створений адитивний комітетний нейромережевий метод побудови багатовимірних метамodelей вихрострумів перетворювачів. Показано підходи остаточної оцінки адекватності й інформативності отриманих метамodelей за сукупністю статистичних показників. Також в цій главі наведено можливі варіанти функцій апроксимації багатовимірних поверхонь відгуку для низки різновидів структур систем збудження вихрострумів перетворювачів.

У *третьій главі* розглянуто створення методів оптимального сурогатного синтезу кругових рухомих накладних вихрострумів перетворювачів з планарною та об'ємною структурами систем збудження, які забезпечують однорідну чутливість до дефектів, що є необхідною умовою для розпізнавання дефектів суцільності в комп'ютеризованих системах контролю якості виробів. Ці методи розроблено в рамках єдиної методології оптимального синтезу всього класу рухомих вихрострумів перетворювачів, яку запропоновано в главі 2. Здійснено побудову метамodelей систем збудження накладних вихрострумів перетворювачів, оцінено їх адекватність за низкою статистичних показників. Наведено чисельні результати параметричного оптимального сурогатного синтезу систем збудження накладних вихрострумів перетворювачів з круговою планарною та об'ємною структурами.

У *четвертій главі* на основі запропонованого єдиного методологічного підходу до синтезу рухомих вихрострумів перетворювачів створено метод оптимального сурогатного синтезу рамкових рухомих накладних вихрострумів перетворювачів з планарною структурою систем збудження. Виконано побудову метамodelей системи збудження накладного вихрострумів перетворювача. Здійснена верифікація отриманої метамodelей.

Отримано в результаті умовної оптимізації з використанням створеної метамodelей синтезовані варіанти конструкцій рухомих квадратних накладних вихрострумів перетворювачів з планарною структурою систем збудження. Синтезовані варіанти показали кращі результати щодо однорідності розподілу густини вихрових струмів в порівнянні із класичним накладним вихрострумів перетворювачем із системою збудження у вигляді одинарного квадратного витка.

У *п'ятій главі* відповідно до запропонованого єдиного методологічного підходу до синтезу рухомих вихрострумів перетворювачів створено метод оптимального сурогатного синтезу тангенціальних рамкових

рухомих накладних вихрострумів перетворювачів з об'ємною структурою систем збудження. Розглянуто можливі варіанти конструкцій тангенціальних накладних вихрострумів перетворювачів, що відрізняються розташуванням вимірювальної котушки перетворювача. Здійснено побудову метамоделі системи збудження тангенціального накладного вихрострумів перетворювача, оцінена її адекватність за низкою статистичних показників. Наведено чисельні результати параметричного оптимального сурогатного синтезу систем збудження тангенціальних накладних вихрострумів перетворювачів з об'ємною структурою.

У шостій главі запропоновано ряд можливих підходів до практичної реалізації систем збудження синтезованих накладних вихрострумів перетворювачів. Оцінено похибки всіх способів нівелювання спотворень розподілу густини вихрових струмів при виготовленні конкретного варіанта синтезованого накладного вихрострумів перетворювача на практиці.

У додатках наведено програми створення багатовимірних комп'ютерних однорідних планів експерименту на основі  $R_d$ -послідовностей та  $LP_\tau$ -послідовностей Соболя; програми реалізації генетичного алгоритму оптимізації, алгоритму оптимізації роєм частинок PSO із випадковою динамічно змінною топологією зв'язків, гібридного алгоритму оптимізації на основі генетичного алгоритму з локальним пошуком методом Нелдера-Міда; чотиривимірний однорідний комп'ютерний план експерименту на основі  $R_d$ -послідовностей для побудови метамоделі кругового накладного вихрострумів перетворювача з об'ємною структурою систем збудження у декомпозиційній підобласті; тривимірний однорідний комп'ютерний план експерименту на основі  $LP_\tau$ -послідовностей для побудови метамоделі рамкового накладного вихрострумів перетворювача з планарною структурою системи збудження у декомпозиційній підобласті; вагові коефіцієнти RBF-нейронної мережі метамоделі, отриманої в результаті адитивної регресії гіперповерхні відгуку для рамкового накладного вихрострумів перетворювача з планарною структурою системи збудження.



### **Гальченко Володимир Якович**

Отримав ступінь доктора технічних наук у Харківському державному політехнічному університеті в 1999 р. Наразі є професором кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій у Черкаському державному технологічному університеті. Автор понад 320 наукових робіт, серед яких три монографії та десять навчальних посібників. Розробив біонічні методи еволюційного та популяційного з використанням метаевристик ройового інтелекту структурно-параметричного синтезу джерел магнітного поля з заданим розподілом, методи оптимального намагнічування об'єктів складної геометричної форми для задач магнітної та електромагнітної дефектоскопії, алгоритми фільтрації сигналів з використанням комбінованого вейвлет-фільтру та фільтру Калмана.

Член Українського товариства неруйнівного контролю. Наукові інтереси: неруйнівний контроль, математичне моделювання, оптимізація та інтелектуальний аналіз даних

### **Трембовецька Руслана Володимирівна**

Отримала ступінь доктора технічних наук в Черкаському державному технологічному університеті в 2021 р. та є доцентом кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій цього вузу.

Автор та співавтор понад 300 наукових робіт, серед яких одна колективна монографія та п'ять навчальних посібників.

Член Українського товариства неруйнівного контролю. Наукові інтереси: неруйнівний контроль, математичне моделювання, оптимізація та інтелектуальний аналіз даних



### **Тичков Володимир Володимирович**

Отримав ступінь кандидата технічних наук в Черкаському державному технологічному університеті в 2017 р. та є доцентом кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій цього вузу.

Автор та співавтор понад 240 наукових робіт, серед яких одна колективна монографія.

Член Українського товариства неруйнівного контролю. Наукові інтереси: неруйнівний контроль, математичне моделювання, оптимізація та інтелектуальний аналіз даних.



Відкритий доступ:

<https://www.twirpx.com/file/3627211/>

<https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/3386>