

Міністерство освіти і науки України  
Черкаський державний технологічний університет

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Сторчак Анатолій Вячеславович**

УДК № 620.179.147:519.853.6

**Дисертація**

**Система вихрострумового вимірювання приповерхневих  
радіальних профілів електрофізичних характеристик  
циліндричних об'єктів**

152 — Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Подається на здобуття наукового ступеня  
доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ А. В. Сторчак

Науковий керівник: **Гальченко Володимир Якович**,  
доктор технічних наук, професор

Черкаси — 2024

## АНОТАЦІЯ

*Сторчак А. В.* Система вихрострумове вимірювання приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об'єктів. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 — Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка. — Черкаський державний технологічний університет; Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, 2024.

В дисертаційній роботі було розв'язано задачу щодо вимірювання приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об'єктів та описано процес створення такої системи вимірювання на основі реалізованої сурогатної моделі процесу вихрострумове контролю...

*Ключові слова:* вихрострумове вимірювання, моніторинг, циліндричний об'єкт контролю, радіальні профілі магнітної проникності і електричної провідності, сурогатна модель, нейромережа, однорідний комп'ютерний план експерименту, ... .

## ABSTRACT

*Storchak A. V.* System of eddy current measurement of subsurface radial profiles of electrophysical characteristics of cylindrical objects. — Qualification scientific work in the form of manuscript.

Thesis for doctor of philosophy degree in speciality 152 — Metrology and information-measuring technique. — Cherkasy State Technological University; Cherkasy State Technological University, Cherkasy, 2024.

The dissertation solves the problem of measuring the subsurface radial profiles of the electrophysical properties of cylindrical objects and describes the process of creating such a measurement system based on the implemented surrogate model of the eddy current testing process...

*Key words:* eddy current measurement, monitoring, cylindrical test object, radial profiles of magnetic permeability and electrical conductivity, surrogate model, neural network, uniform computer design of experiment, ...

### Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. V. Y. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, “Non-linear surrogate synthesis of the surface circular eddy current probes”, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 95, no. 9, pp. 76–82, 2019, Indexed in SCOPUS, Web of Science, EBSCO, INSPEC, BAZTECH. doi: 10.15199/48.2019.09.15. [Online]. Available: <http://pe.org.pl/articles/2019/9/15.pdf>.
2. В. Я. Гальченко, В. В. Тичков, А. В. Сторчак та Р. В. Трембовецька, “Відновлення приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об’єктів при вихрострумових вимірюваннях із наявністю апіорних даних. Формування вибірки для побудови сурога-

- тної моделі”, *Український метрологічний журнал*, № 1, с. 35—50, 2020, Indexed in Web of Science. doi: 10.24027/2306-7039.1.2020.204226.
3. V. Y. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, “The construction of effective multidimensional computer designs of experiments based on a quasi-random additive recursive rd-sequence”, *Applied Computer Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 70–76, 2020, Indexed in Web of Science. doi: 10.2478/acss-2020-0009.
  4. В. Я. Гальченко, А. В. Сторчак, Р. В. Трембовецька та В. В. Тичков, “Створення сурогатної моделі для відновлення приповерхневих профілів електрофізичних характеристик циліндричних об’єктів”, *Український метрологічний журнал*, № 3, с. 27—35, 2020, Indexed in Web of Science. doi: 10.24027/2306-7039.3.2020.216824.
  5. В. Я. Гальченко, А. В. Сторчак, В. В. Тичков та Р. В. Трембовецька, “Вимірювання приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об’єктів вихрострумовим методом із застосуванням апіорних даних”, *Український Метрологічний Журнал*, № 1, с. 5—11, 2022, Indexed in Web of Science, issn: 2306-7039. doi: 10.24027/2306-7039.1.2022.258678. url: <https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/4118>.
  6. R. V. Trembovetska, V. Y. Halchenko, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, “Linear synthesis of uniform anaxial eddy current probes with a volumetric structure of the excitation system”, *International Journal “NDT Days”*, vol. 3, no. 4, pp. 184–190, 2020, Фахове закордонне видання. [Online]. Available: <https://www.bg-s-ndt.org/journal/vol3/JNDTD-v3-n4-a01.pdf>.
  7. В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, В. В. Тичков та А. В. Сторчак, “Методи створення метамоделей: стан питання”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4 (151), с. 74—88, 2020, Фахове наукометричне видання, категорія Б. doi: 10.31649/1997-9266-2020-151-4-74-88.

8. Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко, В. В. Тичков та А. В. Сторчак, “Оцінка точності нейромережових метамodelей кругових накладних вихрострумових перетворювачів”, *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 18—29, 2019, Фахове наукометричне видання, категорія Б. doi: 10.24025/2306-4412.2.2019.171272.
9. A. V. Storchak and V. Y. Halchenko, “Research of eddy current processes of testing objects: Surface rectangular tangential probe”, in *Наукове видання Проблеми інформатизації: Тези доповідей п’ятої міжнародної науково-технічної конференції*, Cherkasy State Technological University (ChSTU), Черкаси, Баку, Бельсько-Бяла, Полтава, Nov. 13–15, 2017, p. 95.
10. А. В. Сторчак, В. В. Тичков, Р. В. Трембовецька та В. Я. Гальченко, “Нейромережеве моделювання в задачах відновлення електрофізичних параметрів циліндричних об’єктів при вихрострумовому контролі”, в *Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно-небезпечних об’єктах: Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених*, Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), Харків, 1—2 листоп. 2018, с. 71—73.
11. А. В. Сторчак, В. В. Тичков, Р. В. Трембовецька та В. Я. Гальченко, “Побудова математичної моделі прямої задачі в проблемі реконструкції електрофізичних параметрів циліндричних об’єктів контролю вихрострумовим методом”, в *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*, Ukrainian Society for Non-Destructive Testing (USNDT), т. 2, Lublin, Poland, 15—19 жовт. 2018, с. 50—51.
12. В. Я. Гальченко, В. В. Тичков, Р. В. Трембовецька та А. В. Сторчак, “Сурогатне моделювання в задачах ідентифікації параметрів об’єктів контролю”, в *Інформатика, математика, автоматика (ІМА-2019): науково-*

*практична конференція, Сумський державний університет (СДУ), Суми, 23—26 квіт. 2019, с. 189.*

## ЗМІСТ

<b>Перелік умовних позначень</b>	<b>9</b>
<b>Вступ</b>	<b>11</b>
Список використаних джерел до вступу . . . . .	16
<b>Розділ 1. Огляд методів та засобів розв’язку задачі встановлення структурних особливостей матеріалу циліндричних об’єктів контролю</b>	<b>18</b>
1.1. Огляд методів визначення електрофізичних характеристик об’єктів вихрострумовим методом . . . . .	18
1.2. Огляд методів створення сурогатних моделей із накопиченням апріорних даних . . . . .	23
1.2.1. Евристичні моделі . . . . .	23
1.3. Аналіз методів створення комп’ютерних однорідних планів експериментів . . . . .	24
1.4. Огляд методів застосування штучних нейронних мереж для розв’язку обернених задач . . . . .	24
1.4.1. Особливості розв’язку обернених задач з використан- ням нейромереж . . . . .	24
1.5. Висновки до розділу 1 . . . . .	24
1.6. Список використаних джерел до розділу 1 . . . . .	25
<b>Розділ 2. Метод вимірювання профілів електрофізичних параме- трів матеріалу циліндричних об’єктів з апріорним нако- пиченням даних</b>	<b>28</b>
2.1. Концептуальна постановка задачі . . . . .	28

2.2. “Точна” електродинамічна модель процесу вимірювання вихрострумовим перетворювачем електрофізичних параметрів циліндричних об’єктів контролю . . . . .	28
2.3. Створення сурогатної моделі процесу контролю з апіорним накопиченням інформації . . . . .	32
2.4. Висновки до розділу 2 . . . . .	34
2.5. Список використаних джерел до розділу 2 . . . . .	34
<b>Розділ 3. Алгоритмічне і програмне забезпечення для вимірювань профілів електрофізичних параметрів методом з апіорним накопиченням даних</b>	<b>35</b>
3.1. Програмне забезпечення для “точного” моделювання процесів вихрострумового контролю в об’єктах циліндричної форми	35
3.2. Програмне забезпечення для створення комп’ютерних однорідних планів експериментів . . . . .	35
3.3. Висновки до розділу 3 . . . . .	36
3.4. Список використаних джерел до розділу 3 . . . . .	36
<b>Розділ 4. Програмно-апаратний комплекс для вимірювання профілів електрофізичних параметрів циліндричних об’єктів контролю</b>	<b>37</b>
4.1. Апаратна частина комплексу . . . . .	37
4.2. Висновки до розділу 4 . . . . .	41
4.3. Список використаних джерел до розділу 4 . . . . .	41
<b>Висновки</b>	<b>42</b>
<b>Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації</b>	<b>43</b>
A.1. Відомості про апробацію результатів дисертації . . . . .	48
<b>Додаток Б. Акти впровадження</b>	<b>50</b>



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ОК — об'єкт контролю;  
ЕП — електрична провідність;  
МП — магнітна проникність;  
ПЕ — план експерименту;  
ЕРС — електрорушійна сила;  
LUT — lookup table;  
ВСП — вихрострумний перетворювач;  
APDL — ANSYS parametric design language;  
ІНМ, НМ — штучна нейронна мережа;  
MARs — multivariate adaptive regression splines;  
NURBs — non-uniform rational B-splines;  
ANN — artificial neural networks;  
RBF — radial basis function;  
MLP — multilayer perceptron;  
SVM — support vector machine;  
GMDH — group method of data handling;  
TPs — thin plate splines;  
DNN, DANN — deep artificial neural networks;  
FEM — finite element method;  
RL — reinforcement learning;  
GAN — generative adversarial network;  
AE — autoencoder;  
VAE — variational autoencoder;  
INN — invertible neural network;  
DL — deep learning;

CVNN — complex-valued neural network;

SCVNN — splittable complex-valued neural network;

RVNN — real-valued neural network;

MAE — mean absolute error;

MSE — mean square error;

RMSE — root mean square error;

MAPE — mean absolute percentage error;

DDS — direct digital synthesizer.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Відомості щодо змін мікроструктури в приповерхневих шарах металевого прокату в результаті оброблення тиском, в деталях після проведення технологічних операцій зміцнення їх поверхонь або термохімічної модифікації, в електроенергетичному обладнанні внаслідок дії на нього механічних деформацій та перерозподілу концентрації пружних напружень тощо є важливою інформацією для впровадження у виробництво сучасних методів неруйнівного контролю якості виробів та матеріалів, забезпечення доброякісності виконання технологічних процесів моніторингу та діагностування критичних станів устаткування. Приповерхневі зміни мікроструктури об'єктів спостереження призводять до трансформації фізико-механічних поверхневих властивостей їх матеріалу. Отже, інформація щодо в'язкості, пластичності, твердості, теплоємності, міцності, а окрім того хімічного і фазового складу приповерхневого шару матеріалу, може бути отримана завдяки кореляційним зв'язкам фізико-механічних властивостей об'єктів дослідження з розподілами електричної провідності та магнітної проникності у приповерхневій зоні, тобто їх профілями. Це в свою чергу обумовило можливість використання для визначення профілів електрофізичних параметрів, котрі є високо структуро-чутливими, вихрострумowego методу вимірювань. Слід зазначити, що значну частину об'єктів спостереження складають вироби, які характеризуються циліндричною геометричною формою. Тому є доцільним використання прохідних вихрострумowych перетворювачів, вимірювання якими дозволяє в результаті розв'язку оберненої електродинамічної задачі відтворити радіальні профілі електричної провідності та магнітної проникності. Значний здобуток у розвиток теорії вихрострумowego контролю внесений в тому числі й

українськими вченими, зокрема Троїцьким В.О., Маєвським С.М., Гальченком В.Я., Куцом Ю.В., Сучковим Г.М., Учаніним В.М., Хандецьким В.С.. Дослідженням питань, зв'язаних з вимірюваннями електрофізичних параметрів об'єктів дослідження вихрострумовим методом, присвячені роботи низки українських вчених, зокрема Назарчука З.Т., Себка В.П., Тетерка А.Я., Горкунова Б.М., Синявського А.Т. тощо. Можна також відмітити неабиякий інтерес іноземних науковців до цієї тематики, серед яких варто відзначити Theodoulidis T., Bowler N., Ida N., Lu M., Tesfalem H., Hampton J., Huang R., Burkhardt J., Xu J. та інших. Не зважаючи на достатньо глибоке опрацювання ними широкого кола питань щодо ідентифікації профілів електрофізичних параметрів об'єктів контролю (ОК), запропоновані методи виконання завдань таких задач не завжди є такими, що повною мірою реалізують існуючі на цей час вимоги. Зокрема дослідниками майже не приділялася увага розробленню засобів та методів визначення профілів електричної провідності (ЕП) та магнітної проникності (МП), здатних розв'язувати цю задачу водночас для обох розподілів в реальному масштабі часу з високою точністю по однократному результату реєстрації амплітуди та фази сигналу перетворювача вихрострумової вимірювальної системи. Тому варто сконцентруватися на подальшому розвитку відповідних досліджень щодо створення цілковито нових оригінальних підходів для досягнення цієї мети. Отже, доцільність пропонованого дисертаційного дослідження визначається необхідністю ефективного вирішення зазначених вище питань, а прикладна задача, що розглядається у його рамках, є актуальною та представляє суттєвий науковий та практичний інтерес.

**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 2018 - 2024 р.р. у межах ініціативних

науково-дослідницьких робіт за темами: “Обернені задачі вихрострумowego контролю: моделі, алгоритми, методи оптимізації”, номер держреєстрації №0120U103875; “Розробка, дослідження експрес-методів вихрострумowego вимірювання профілів електрофізичних параметрів об’єктів, що пройшли технологічні операції зміцнення поверхні”, номер держреєстрації №0122U200836, що відповідає напрямам досліджень, які започатковані в університеті. Здобувач як виконавець брав безпосередню участь в виконанні наведених досліджень.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є створення системи вихрострумowego спільного вимірювання обох приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об’єктів контролю, реалізованої із застосуванням експрес-методу, який передбачає апріорне накопичення даних щодо них у нейромережевій сурогатній моделі та наступне її використання для підвищення точності вимірювань у динамічній таблиці другого рівня при швидкому пошуку розв’язку задачі за технологією Lookup tables. Для досягнення мети дослідження необхідно виконання наступних завдань:

- проведення аналізу предметної області, а саме існуючих методів та засобів вимірювання приповерхневих профілів електрофізичних характеристик ОК, виявлення їх недоліків та обґрунтування перспективних нових підходів до підвищення швидкодії, ефективності та точності їх визначення;
- обґрунтування та розроблення низки багатовимірних комп’ютерних ...
- ...

**Об’єкт дослідження** — процеси вихрострумowego вимірювального контролю струмопровідних об’єктів.

**Предмет дослідження** — вихрострумова система та експрес-метод вимі-

рювання приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об'єктів прохідними перетворювачами.

В процесі реалізації поставлених завдань були застосовані наступні **методи досліджень**: для опису процесів вихрострумового контролю циліндричних об'єктів - теорія електромагнітного поля, теорія інтегрального числення, теорія диференціальних рівнянь у частинних похідних, спеціальні функції математичної фізики, теорія матриць, чисельні методи, метод моделювання, теорія похибок; для створення однорідних ПЕ - теорія планування експериментів, методи математичної статистики, методи обчислювальної геометрії; для створення нейромережових сурогатних моделей – теорія оптимізації, методи штучного інтелекту, методи машинного навчання, методи математичної статистики, теорія похибок. Для підтвердження обчислювальної ефективності запропонованих методів та визначення їх точності використано комп'ютерні експерименти.

**Наукова новизна одержаних результатів.** В процесі виконання поставлених завдань одержано наступні результати:

- вперше розроблено експрес-метод вимірювання радіальних приповерхневих профілів електричної провідності та магнітної проникності в об'єктах циліндричної форми, який відрізняється тим, що при застосуванні ...
- ...

**Практичне значення отриманих результатів.**

- розроблено алгоритми та відповідні програмні засоби формування ефективних комп'ютерних однорідних багатовимірних квазі-планів експериментів із покращеною гомогенністю 2D-проекцій та гарантовано низькими розбіжностями;
- ...

**Використання результатів роботи.** Результати проведених досліджень знайшли практичне впровадження в навчальних процесах кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету; кафедри виробництва приладів...

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати дисертаційної роботи автор отримав самостійно. У публікаціях, підготовлених в співавторстві, здобувачеві належать такі результати: у праці [1] - створення нейромережевої сурогатної моделі; у [2] - створення програм обчислення сигналу від вихрострумових перетворювачів, проведення числових розрахунків; у [3] - візуалізація планів експерименту за допомогою діаграм Вороного, огляд методів створення квазі випадкових послідовностей; у [4] - створення сурогатної моделі прохідного перетворювача при контролі циліндричних об'єктів.

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та підлягали обговоренню на таких Міжнародних та Всеукраїнських наукових конференціях: XV-та міжнародна конференція «Контроль і управління в складних системах», (м. Вінниця, 2020); Міжнародний симпозіум «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (м. Харків, 2020); Міжнародна конференція «Дни на безразрушителния контрол» (м. Созополь, Болгарія, 2020); Міжнародна науково-практична on-line конференція «Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві» ( м. Кропивницький, 2020); Міжнародних симпозіумах «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (м. Харків, 2020 та 2023); XI Міжнародна науково-технічна конференція «Датчики, прилади та системи» (м. Черкаси, 2024).

Основні результати дослідження доповідалися на наукових конференціях різного рівня. Це такі конференції:

- V Міжнародній науково-практичній конференції "Інформаційні технології в освіті, науці і техніці" (ІТОНТ-2020) Черкаси, 21–22 травня 2020 р.;
- XV Міжнародна конференція "Контроль і управління в складних системах" (КУСС-2020) Вінниця, 8–10 жовтня 2020 р.;
- ...

**Публікації.** Матеріали дисертаційного дослідження опубліковані у 27 наукових роботах, в тому числі 8 статтях, із яких 3 статті у закордонних періодичних наукових виданнях; 2 статті у виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України; 4 статей у періодичних наукових виданнях, включених до наукометричної бази Web of Science; 1 стаття у періодичному науковому виданні, включеному до наукометричної бази Scopus; 1 стаття в періодичному закордонному фаховому виданні. Інші 19 публікацій - у матеріалах конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, а також двох додатків. До кожного розділу наводиться список використаних джерел, що містить загалом 151 найменувань. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 160 сторінок, у тому числі 123 сторінки основного тексту, ілюстрованого 56 рисунками, який містить 30 таблиць.

### **Список використаних джерел до вступу**

1. V. Y. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, "Non-linear surrogate synthesis of the surface circular eddy current probes", *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 95, no. 9, pp. 76–82, 2019, Indexed in SCOPUS, Web of Science, EBSCO, INSPEC, BAZTECH. doi: 10.15199/48.2019.09.15. [Online]. Available: <http://pe.org.pl/articles/2019/9/15.pdf>.



2. В. Я. Гальченко, В. В. Тичков, А. В. Сторчак та Р. В. Трембовецька, “Відновлення приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об’єктів при вихрострумових вимірюваннях із наявністю апіорних даних. Формування вибірки для побудови сурогатної моделі”, *Український метрологічний журнал*, № 1, с. 35—50, 2020, Indexed in Web of Science. doi: 10.24027/2306-7039.1.2020.204226.
3. V. Y. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, “The construction of effective multidimensional computer designs of experiments based on a quasi-random additive recursive rd-sequence”, *Applied Computer Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 70–76, 2020, Indexed in Web of Science. doi: 10.2478/acss-2020-0009.
4. В. Я. Гальченко, А. В. Сторчак, Р. В. Трембовецька та В. В. Тичков, “Створення сурогатної моделі для відновлення приповерхневих профілів електрофізичних характеристик циліндричних об’єктів”, *Український метрологічний журнал*, № 3, с. 27—35, 2020, Indexed in Web of Science. doi: 10.24027/2306-7039.3.2020.216824.

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ВСТАНОВЛЕННЯ СТРУКТУРНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛУ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ КОНТРОЛЮ

#### 1.1. Огляд методів визначення електрофізичних характеристик об'єктів вихрострумовим методом

Наразі є відомими чимала кількість варіантів щодо підходів розв'язку досліджуваної проблеми або суміжних задач вихрострумового контролю. Критичний аналіз відомих науково-технічної літератури показав особливості, доцільність і ефективність цих варіантів. Нижче наведений опис підходів та методів розв'язку обернених задач вихрострумового контролю із зазначенням їхніх переваг та недоліків. В статті [1] наведено приклад розв'язку оберненої задачі багатопараметрового контролю структурних змін матеріалу ОК змінно-частотним методом. Метод забезпечує контроль певної товщини шару матеріалу, що є корисним, наприклад, при контролі глибини термічної обробки матеріалу. Та хоч він і належить до багатопараметрових, що дозволяє контролювати інтегральний електромагнітний параметр  $\eta = f(\mu, \sigma)$ , але він не дозволяє окремо контролювати ЕП та МП. Багатопараметровий контроль кожного з параметрів можливий за допомогою окремої математичної моделі, що описує залежність вихідного сигналу від параметрів матеріалу. Підхід до розв'язку оберненої задачі є оптимізаційним на основі методу Флетчера–Пауела, що дозволяє оцінити відхилення виміряного та модельованого сигналу. Загалом метод є досить точним, але не використовує інформативність сигналу в повному обсязі (не включає амплітуду як інформативну складову), до того ж оптимізаційні підходи як правило не дозволяють проводити обробку

сигналу в масштабах наближених до реального часу.

В публікації [1] розв'язок оберненої задачі електродинаміки щодо реконструкції структури ОК за вимірними сигналами вихрострумowego перетворювача (ВСП) рекомендується знаходити засобами лінійного програмування.

Лінійні припущення описані в роботі [2], які використано при побудові математичної моделі рис. 1.1, а відповідно й запропонований метод суперпозиції, не є строгими і значно спрощують реальні фізичні процеси. Крім того, при проведенні вимірних операцій використовуються декілька частот, що ускладнює проведення процедури.

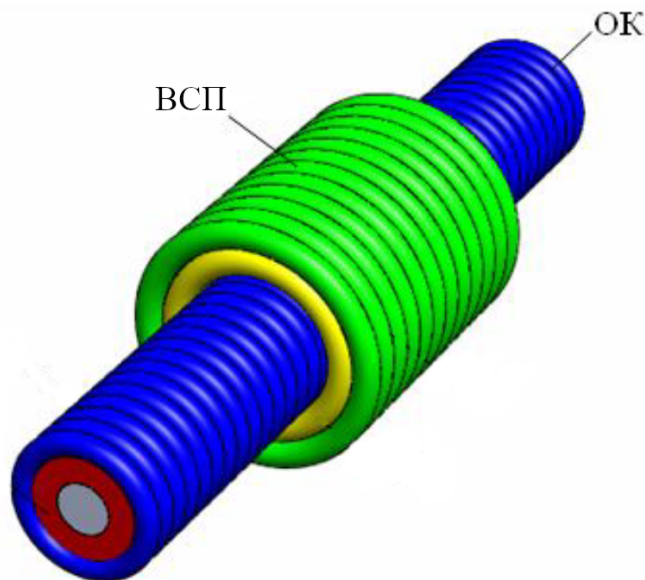


Рис. 1.1. Модель ВСП з циліндричним ОК, поверхня якого являє собою двохшарову котушку.

У дослідженнях [3], [4] розглянуто електромагнітний перетворювач із просторово-періодичною структурою поля рис. 1.2, що дозволяє проводити контроль та вимірювання параметрів ЕП та МП металевих виробів у формі протяжного феромагнітного циліндра. Автори пропонують використовувати специфічні гармоніки сигналу для визначення та виділення відхилень параметрів структури матеріалу ОК. Цей метод є досить вимогливим до якості сигналу самого ВСП та провздожнє покриття циліндричного ОК робить

його чутливість, а саме визначення локальних відхилень електрофізичних параметрів ОК, менш точною.

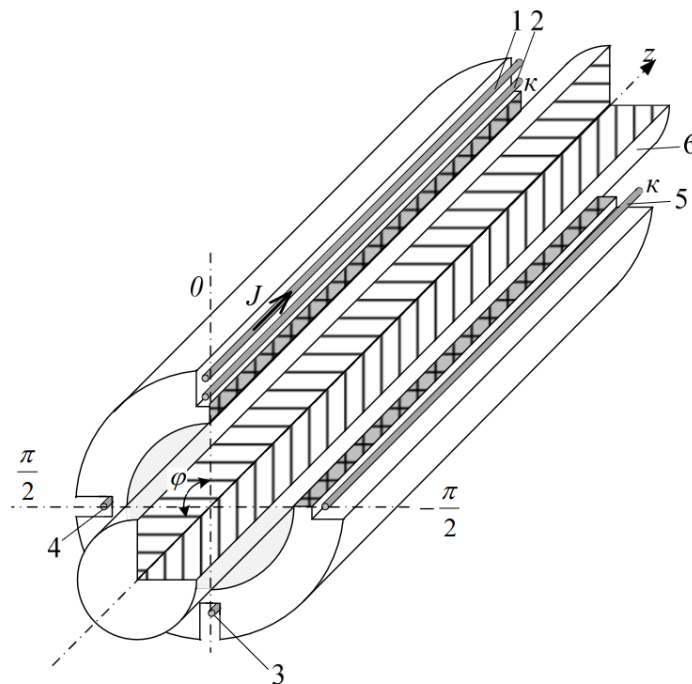


Рис. 1.2. Розташування котушок збудження вздовж металевого циліндра, де 1 — провідник збудження, 2–5 — вимірювальні провідники, 6 — ОК

В наступній роботі [5] пропонується вимірювання параметрів ЕП та МП шляхом проведення вимірювання поздовжніми провідниками за спеціальною методологією зустрічного та паралельного включення струмів збудження та комбінацій позиціонування вимірювальних та збуджуючих обмоток рис. 1.3. Метод є ефективним та досить перспективним в автоматизованих системах контролю, але вимога забезпечення комбінацій точного позиціонування котушок для системи вимірювання є недоліком, що призводить до ускладнення практичного застосування таких вимірювальних перетворювачів. Також для отримання інформативних результатів при спрощених конфігураціях запропонованих ВСП, а саме зменшення кількості вимірювальних та збуджуючих котушок, є необхідність проведення серії вимірювань з додатковим переміщенням ВСП навколо ОК рис. 1.4, що є небажаною технологічною операцією

при впровадженні даного методу в виробництво. Крім того, можливими є похибки просторового позиціювання вимірювальних обмоток, що призводить до додаткових похибок вимірювання.

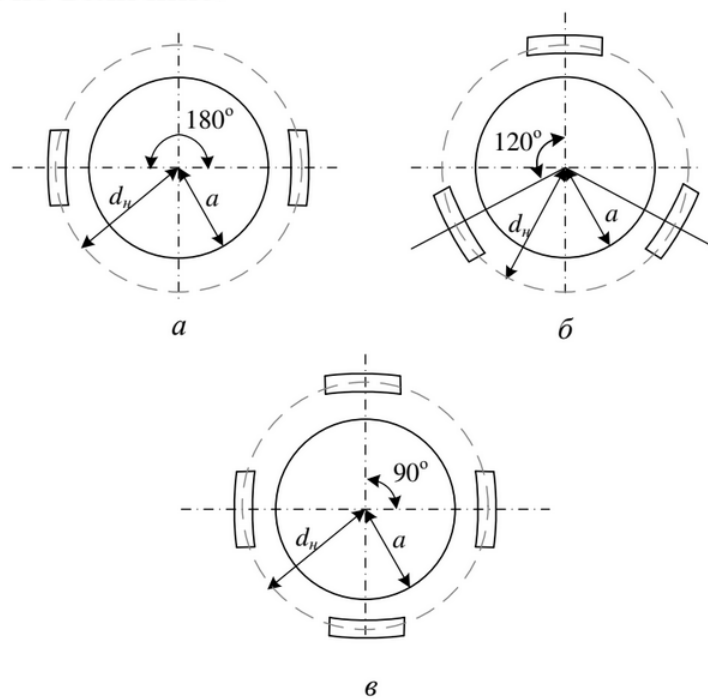


Рис. 1.3. Поперечний переріз намагнічувальних систем зі струмами одного і того ж напрямку та однаковими за величиною.

В публікаціях [6]—[8] вирішення проблеми вихрострумовевого контролю товщини оболонок виробів та захисних покриттів виробів, а також підвищення точності вимірювання контрольованих величин пропонується за допомогою введення автоматизованих систем з використанням зворотної функції перетворення та розрахунку її наближеного значення. Автори окреслюють основні принципи та вимоги, яким має відповідати апаратура контролю параметрів ОК, і показують конкретний приклад реалізації основних елементів такого вимірювального приладу. Так як задача контролю параметрів ОК є оберненою і нелінійною, модель зворотної функції перетворення представлено багатовимірним поліномом у базисі інформаційних параметрів. Відповідно при використанні прямої функції перетворення відшукується розв'язок

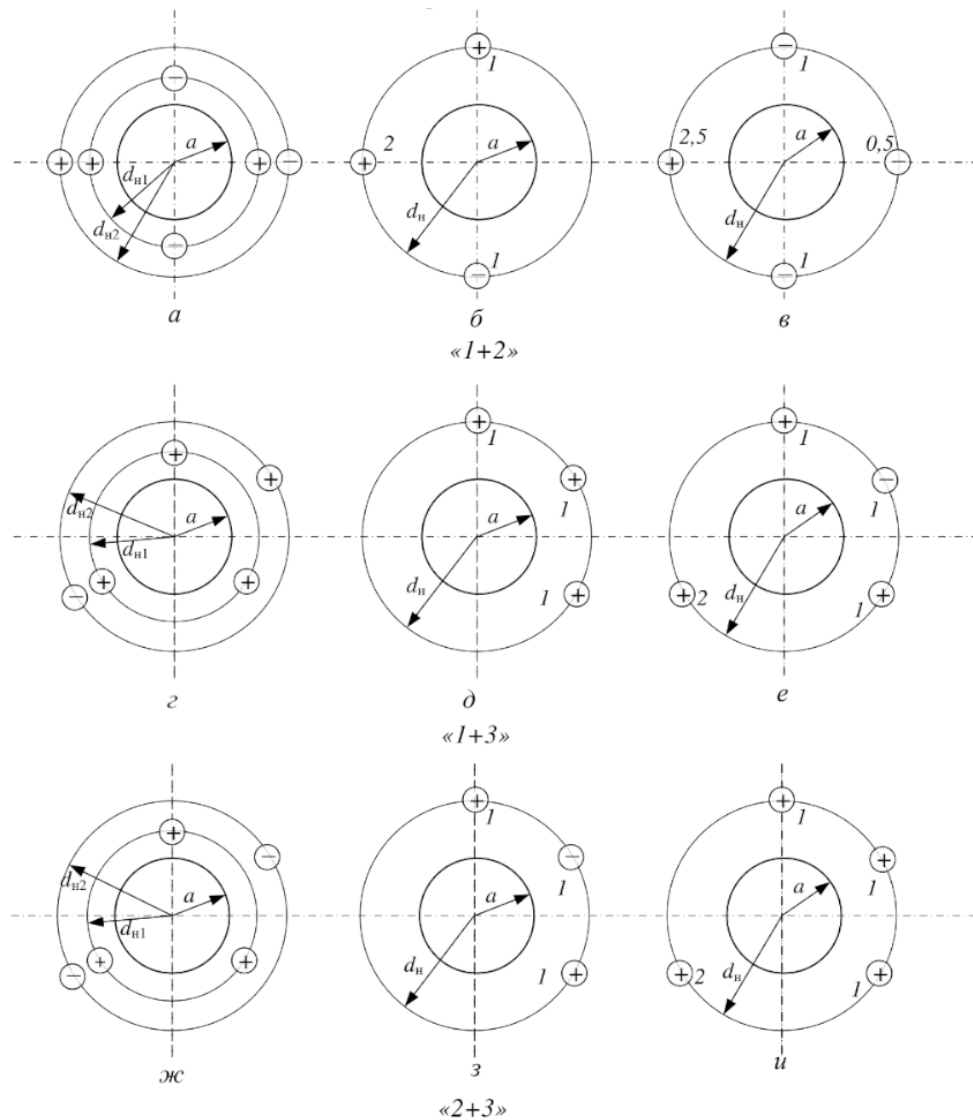


Рис. 1.4. Комбінації намагнічуючих систем перетворювачів з необхідною сумою переважаючих гармонік зондуемого поля.

системи нелінійних рівнянь відносно невідомих параметрів. У випадку використання зворотної функції для визначення параметрів ОК застосовується знайдена нелінійна поліноміальна залежність від компонент вектора інформаційних параметрів перетворювача. Зазначений вище метод може бути застосований в масштабах реального часу та потребує відносно малих обчислювальних ресурсів на обрахунок результату. До недоліків методу слід віднести певні труднощі вибору структури полінома, що апріорі є невідомою, яка би забезпечила прийнятну похибку апроксимації гіперповерхні відгуку.

Також відзначимо, що з ростом числа невідомих параметрів ОК (зазору, товщини ОК додатково), а відповідно розмірності гіперпростору, провести поліноміальну апроксимацію стає практично неможливим, а спрощена поліноміальна функція в свою чергу зменшує точність результату.

## 1.2. Огляд методів створення сурогатних моделей із накопиченням апріорних даних

Зазвичай розв'язання обернених задач в багатьох сферах науки та техніки потребують застосування оптимізаційних методів...

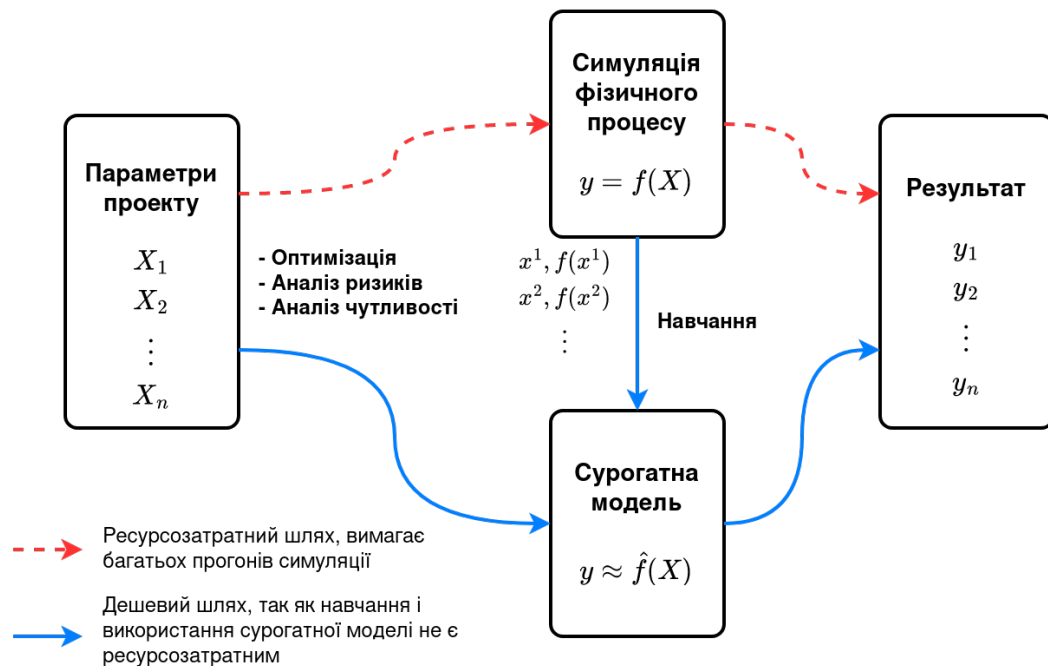


Рис. 1.5. Концепція сурогатного моделювання.

**1.2.1. Евристичні моделі.** Розглядаючи клас евристичних сурогатних моделей...

### **1.3. Аналіз методів створення комп'ютерних однорідних планів експериментів**

Як правило, для побудови адекватних та точних апроксимаційних моделей потрібні...

На рис. 1.6 зображено однорідні вибірки різних двовимірних розподілень. Як видно при звичайному випадковому розподіленні точки схильні утворювати кластери і пробіли, а інші, квазі-випадкові послідовності з низькою розбіжністю, є повністю визначеними послідовностями, що розподіляються по простору так рівномірно наскільки це можливо.

При малій розмірності (одновимірному і двовимірному просторі) квазі-випадкові послідовності видаються менш однорідними ніж лінійне розбиття простору на однакові проміжки, але при збільшенні розмірності вони є найкращим вибором для формування вибірок.

### **1.4. Огляд методів застосування штучних нейронних мереж для розв'язку обернених задач**

**1.4.1. Особливості розв'язку обернених задач з використанням нейромереж.** Застосування нейромереж в дослідженнях на сьогодні досить розповсюджена практика...

### **1.5. Висновки до розділу 1**

В даному розділі подано огляд застосування уже наявних та створення нових основних етапів засобів і методів для ефективного розв'язку обернених задач...



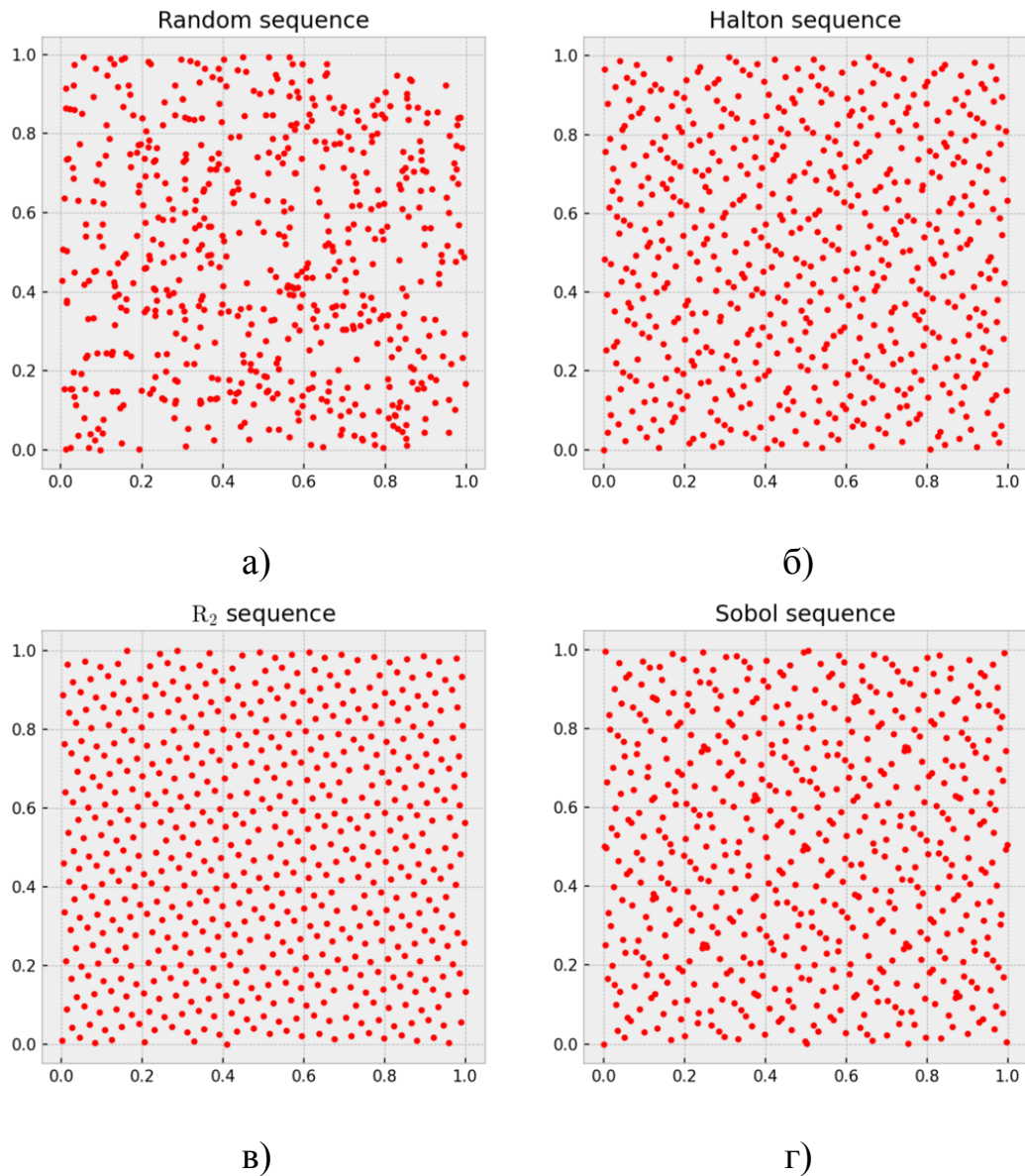


Рис. 1.6. Порівняння двовимірних квазі-випадкових та простої випадкової послідовності: а) прості випадкові послідовності; б) послідовності Халтона; в)  $R_2$  послідовності; г) послідовності Соболя.

### 1.6. Список використаних джерел до розділу 1

1. Б. М. Березюк, У. Б. Марікуца та Т. В. Свірідова, "Розв'язання задачі багатопараметричного контролю металевих виробів змінно-частотним методом вихрових струмів", *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*, Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика, № 564, с. 67—71, 2006. url: <https://cad.lpnu.ua/visnyk/v2006.html>.

2. Б. М. Горкунов та А. А. Тищенко, “Метод суперпозиции при определении глубины упрочненного слоя вихретоковым методом”, *Вестник Нац. техн. ун-та ”ХПИ”*: сб. науч. тр. Темат. вып.: Электроэнергетика и преобразовательная техника, № 19, с. 94—97, 2011. url: [http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/15716/1/vestnik\\_HPI\\_2011\\_19\\_Gorkunov\\_Metod.pdf](http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/15716/1/vestnik_HPI_2011_19_Gorkunov_Metod.pdf).
3. Б. М. Горкунов, Е. А. Борисенко, Т. Шибан та И. Шахин, “Электромагнитный преобразователь с пространственно-периодическим полем для систем многопараметрового контроля”, *Вісник НТУ ”ХПИ”. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*, Т. 1, т. 26, № 1302, с. 80—85, 2018. doi: 10.20998/2413-4295.2018.26.12.
4. B. M. Gorkunov, S. G. Lvov, and E. A. Borisenko, “Uncertainty estimation while proceeding multi-parameter eddy current testing”, *Системи обробки інформації*, vol. Вип. 4, pp. 92—97, 2018. doi: 10.30748/soi.2018.155.12. [Online]. Available: [http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/47492/1/SOI\\_2018\\_4\\_Gorkunov\\_Uncertainly\\_estimation.pdf](http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/47492/1/SOI_2018_4_Gorkunov_Uncertainly_estimation.pdf).
5. Б. М. Горкунов, С. Г. Львов, Т. Шибан та Е. А. Борисенко, “Экспериментальные исследования вихретокового преобразователя с пространственно-периодическими полями”, *Метрологія та прилади*, № 4(72), с. 45—50, 2018, issn: 2307-2180.
6. А. Я. Тетерко та В. І. Гутник, “Побудова зворотної функції перетворення приладів вихрострумового багатопараметрового контролю”, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, т. Т. 47, № 3, с. 103—108, 2011. url: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP\\_meta&C21COM=S&2\\_S21P03=FILE=&2\\_S21STR=PHKhMM\\_2011\\_47\\_3\\_17](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILE=&2_S21STR=PHKhMM_2011_47_3_17).

7. А. Я. Тетерко та В. І. Гутник, “Концепція побудови апаратури багатопараметрового вихрострумового контролю”, *Відбір і обробка інформації: Міжвід. зб. наук. пр.*, т. Вип. 33(109), с. 9—14, 2010. url: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/16217>.
8. А. Я. Тетерко, В. И. Гутник, Г. Г. Луценко та А. А. Тетерко, “Метод многопараметровых вихретоковых измерений толщины, электропроводности материала и толщины диэлектрического покрытия элементов конструкций”, *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, № 3, с. 55—60, 2014. url: <https://patonpublishinghouse.com/tdnk/pdf/2014/tdnk201403all.pdf>.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ПРОФІЛІВ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАТЕРІАЛУ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБ’ЄКТІВ З АПРІОРНИМ НАКОПИЧЕННЯМ ДАНИХ

#### 2.1. Концептуальна постановка задачі

Визначення приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик...

#### 2.2. “Точна” електродинамічна модель процесу вимірювання вихрострумовим перетворювачем електрофізичних параметрів циліндричних об’єктів контролю

Математична модель складалася на основі загальних законів теорії електромагнітного поля Максвелла та описує процес контролю прохідним круговим ВСП циліндричного співвісного ОК. Є відомими аналітичні моделі процесу вихрострумового контролю циліндричних ОК [1], [2], але внаслідок універсальності має сенс використовувати модель Dodd-Deeds [3]. Для спрощення представлення профілів розподілу електрофізичних параметрів у її контексті, пропонується використовувати кусково-постійну апроксимацію, коли ОК вважається умовно багатошаровим та електрофізичні параметри в кожному  $n$ -му шарі із його  $(K-1)$  шарів приймаються сталими:  $\sigma_n = \sigma(r)$ ,  $\mu_n = \mu(r)$ , де  $n = 1, 2, \dots, (K - 1)$  рис. 2.1.

Для коректного опису математичної моделі введено поняття регіону. Кожен регіон у циліндричній системі координат може бути описаний системою таких нерівностей:

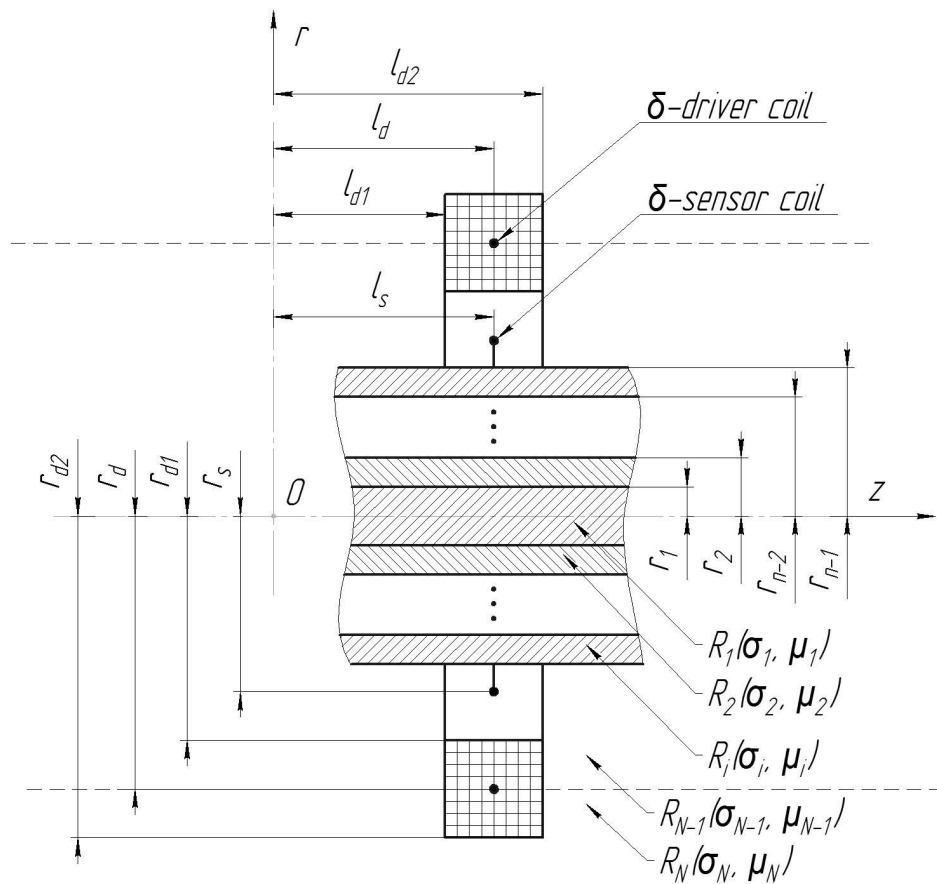


Рис. 2.1. Геометрична модель прохідного ВСП з циліндричним ОК:  $r_{d1}, r_{d2}$  — внутрішній та зовнішній радіуси котушки збудження відповідно;  $r_n$  — зовнішній радіус  $n$ -го шару;  $l_{d1}, l_{d2}$  — відстані до граней котушки збудження,  $r_s$  — радіус вимірювального витка,  $l_s$  — відстань до вимірювального витка.

$$R_1 = \{ 0 \leq r \leq r_1, 0 \leq \varphi \leq 2\pi, -\infty < z < \infty \}$$

$$\vdots$$

$$R_i = \{ r_{i-1} \leq r \leq r_i, 0 \leq \varphi \leq 2\pi, -\infty < z < \infty \}$$

$$\vdots$$

$$R_N = \{ r_{N-1} < r, 0 \leq \varphi \leq 2\pi, -\infty < z < \infty \},$$

де  $i = 2, 3, \dots, (N - 1)$ , а  $N$  — загальна кількість регіонів,  $r_{N-1} = r_d$ .

Математична модель складалася при прийнятті таких припущень [3]: середовища є лінійними, ізотропними та однорідними; струм збудження  $I$  є си-

нусаїдальним, що змінюється з кутовою частотою  $\omega$ . Котушка збудження на початковому етапі розглядається як нескінченно тонкий виток з радіусом  $r_d$ . Також приймається, що осі ВСП та циліндричного ОК співпадають. Густина струму збудження та векторний потенціал у циліндричній системі координат за таких умов мають тільки азимутальну складову:

$$\vec{A}(r, \varphi, z) = A(r, z) \vec{e}_\varphi, \quad \vec{J}(r, \varphi, z) = J(r, z) \vec{e}_\varphi. \quad (2.1)$$

Диференціальні рівняння для векторного потенціалу в регіонах із номерами  $(N - 1)$  та  $N$  можна записати у вигляді:

$$R_{N-1} \cup R_N : \quad \frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} - \frac{A}{r^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} = 0$$

а в регіонах  $R_1, R_2, \dots, R_{N-2}$  відповідно:

$$\frac{\partial^2 A^{(i)}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A^{(i)}}{\partial r} - \frac{A^{(i)}}{r^2} + \frac{\partial^2 A^{(i)}}{\partial z^2} = j\omega\mu_i\sigma_i A^{(i)},$$

де  $i = 1, 2, \dots, (N - 2)$ ,  $\mu_i$  — абсолютна магнітна проникність,  $j = \sqrt{-1}$ .

Враховуючи, що для векторного потенціалу з фізичних міркувань виконуються такі умови: а)  $A$  є скінченним при  $r = 0$ , б)  $A \rightarrow 0$  при  $r \rightarrow \infty$ , та беручи до уваги граничні умови:

$$\begin{aligned} A^{(i)}(r, z) \Big|_{r=r_i} &= A^{(i+1)}(r, z) \Big|_{r=r_i}, \\ \frac{1}{\mu_i} \frac{\partial A^{(i)}}{\partial r}(r, z) \Big|_{r=r_i} &= \frac{1}{\mu_{i+1}} \frac{\partial A^{(i+1)}}{\partial r}(r, z) \Big|_{r=r_i}, \end{aligned}$$

де  $i = 1, 2, \dots, (N - 2)$

$$\begin{aligned} A^{(N-1)}(r, z) \Big|_{r=r_{N-1}} &= A^{(N)}(r, z) \Big|_{r=r_{N-1}}, \\ \frac{1}{\mu_{N-1}} \frac{\partial A^{(N-1)}}{\partial r}(r, z) \Big|_{r=r_{N-1}} &= \frac{1}{\mu_N} \frac{\partial A^{(N)}}{\partial r}(r, z) \Big|_{r=r_{N-1}} + I\delta(r - r_d)\delta(z - z_d), \end{aligned}$$

де  $\delta$  — дельта-функція Дірака, отримано рівняння для векторного потенціалу в будь-якому регіоні всередині витка зі струмом, що має такий вигляд:

$$A(r, z, r_d, z_d) = \frac{I\mu_0 r_d}{\pi} \int_0^\infty \frac{Q_1 Q_2}{U_{22} V_{11} - U_{12} V_{21}} \cos(\alpha(z - z_d)) d\alpha, \quad (2.2)$$

$$Q_1 = V_{11} I_1(\alpha_n r) + V_{21} K_1(\alpha_n r),$$

$$Q_2 = U_{12} I_1(\alpha r_d) + U_{22} K_1(\alpha r_d),$$

де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнітна стала;

$$\begin{aligned} V_{11}(n+1, n) &= \left( K_0(\alpha_{n+1} r_n) I_1(\alpha_n r_n) + \frac{\beta_n}{\beta_{n+1}} I_0(\alpha_n r_n) K_1(\alpha_{n+1} r_n) \right) \alpha_{n+1} r_n; \\ U_{12}(n+1, n) &= \left( K_0(\alpha_{n+1} r_n) K_1(\alpha_n r_n) - \frac{\beta_n}{\beta_{n+1}} K_0(\alpha_n r_n) K_1(\alpha_{n+1} r_n) \right) \alpha_{n+1} r_n; \\ V_{21}(n+1, n) &= \left( I_0(\alpha_{n+1} r_n) I_1(\alpha_n r_n) - \frac{\beta_n}{\beta_{n+1}} I_0(\alpha_n r_n) I_1(\alpha_{n+1} r_n) \right) \alpha_{n+1} r_n; \\ U_{22}(n+1, n) &= \left( I_0(\alpha_{n+1} r_n) K_1(\alpha_n r_n) + \frac{\beta_n}{\beta_{n+1}} K_0(\alpha_n r_n) I_1(\alpha_{n+1} r_n) \right) \alpha_{n+1} r_n; \\ \beta_n &= \left( \frac{\mu_0}{\mu_n} \right) \alpha_n; \end{aligned}$$

$I_0, I_1$  — модифіковані функції Бесселя першого роду нульового та першого порядків від комплексного аргументу;

$K_0, K_1$  — модифіковані функції Бесселя другого роду нульового та першого порядків від комплексного аргументу;

$$\alpha_n = \sqrt{\alpha^2 - j\mu_n \sigma_n}, \quad n = 1, 2, \dots, K.$$

Векторний потенціал в області в середині котушки збудження, яка має прямокутний поперечний переріз та однорідний розподіл густини струму збудження, можна записати у вигляді:

$$A(r, z) = IN_d \int_{l_{d1}}^{l_{d2}} \int_{r_{d1}}^{r_{d2}} A(r, z, r_d, z_d) dr_d dz_d \quad (2.3)$$

де  $N_d = \frac{W}{(r_{d2}-r_{d1})(l_{d2}-l_{d1})}$ ;  $W$  — кількість витків котушки збудження.

Зміною порядку інтегрування та в результаті його виконання отримано вираз для векторного потенціалу:

$$A(r, z) = \frac{IN_d \mu_0 r_d}{\pi} \int_0^\infty \frac{Q1 Q2}{\alpha^3 (U_{22} V_{11} - U_{12} V_{21})} Q3 d\alpha, \quad (2.4)$$

$$Q1 = \sin(\alpha(z - l_{d1})) - \sin(\alpha(z - l_{d2})),$$

$$Q2 = V_{11} I_1(\alpha_n r) + V_{21} K_1(\alpha_n r),$$

$$Q3 = U_{12} I(r_{d2}, r_{d1}) + U_{22} K(r_{d2}, r_{d1}),$$

де  $I(r_{d2}, r_{d1}) = \int_{\alpha r_{d1}}^{\alpha r_{d2}} t I_1(\alpha t) dt$ ;

$K(r_{d2}, r_{d1}) = \int_{\alpha r_{d1}}^{\alpha r_{d2}} t K_1(\alpha t) dt$ .

Наведена в круговому вимірювальному витку напруга з урахуванням (2.4) обчислюється відповідно до співвідношення:

$$E = j\omega \oint_{l_{s-coil}} \vec{A} dl = j\omega 2\pi r_s A(r_s, z_s). \quad (2.5)$$

Таким чином, задаючи обране радіальне розподілення параметрів матеріалу ОК, модель дозволяє отримати необхідний відгук у вигляді напруги в комплексній формі, а це в свою чергу робить її перспективною до використання в даному дисертаційному дослідженні.

### 2.3. Створення сурогатної моделі процесу контролю з апіорним накопиченням інформації

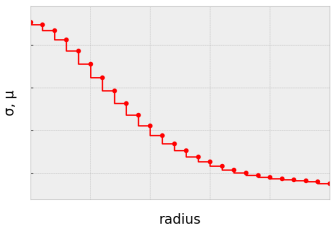
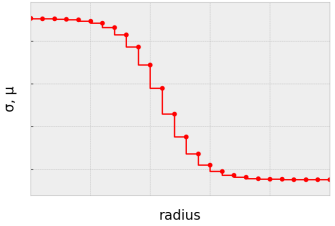
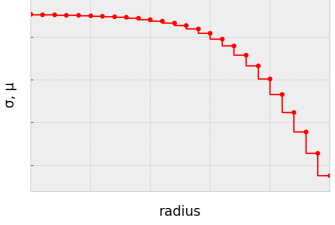
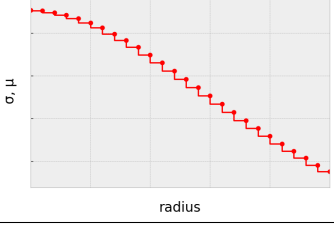
В оглядовому розділі було зроблено...



В [4] було запропоновано базові функції апроксимації розподілення параметрів і наведено приклад детальної апроксимації приповерхневої зони товщиною 1 мм 50-ма умовними шарами. Для дисертаційного дослідження було обрано чотири типи таких функцій, які подано в табл. 2.1 [1], [4]. На практиці профілі електрофізичних характеристик, які вважатимемо “нормою”, тобто взірцем, що отриманий внаслідок коректної технологічної поверхневої обробки ОК одним із відомих способів, можуть бути визначені експериментально.

Таблиця 2.1

**Апроксимаційні функції профілів розподілу електрофізичних параметрів**

Вид апроксимації	Апроксимаційна модель	Графічне зображення
Гаусіан	$\sigma(r) = \sigma_1 + (\sigma_2 - \sigma_1)e^{-\frac{r^2}{g^2}}$ $\mu(r) = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1)e^{-\frac{r^2}{g^2}}$	
гіперболічний тангенс	$\sigma(r) = \sigma_1 + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{2} \left(1 + \tanh \frac{r+c}{2a}\right)$ $\mu(r) = \mu_1 + \frac{\mu_2 - \mu_1}{2} \left(1 + \tanh \frac{r+c}{2a}\right)$	
експоненціальна функція	$\sigma(r) = \sigma_1 + (\sigma_2 - \sigma_1)e^{\frac{r}{b}}$ $\mu(r) = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1)e^{\frac{r}{b}}$	
степенева функція	$\sigma(r) = \sigma_1 + (\sigma_2 - \sigma_1)r^{-2}$ $\mu(r) = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1)r^{-2}$	

У табл. 2.1  $\sigma_1, \mu_1; \sigma_2, \mu_2$  — початкові та кінцеві значення відповідних параметрів зони апроксимації;  $a, b, c, g, r$  — параметри, що задають вигляд апроксимаційної моделі.

## 2.4. Висновки до розділу 2

В цьому розділі в рамках створення експрес-методу запропоновано...

## 2.5. Список використаних джерел до розділу 2

1. V. Koliskina, “Analytical and quasi-analytical solutions of direct problems in eddy current testing”, Ph.D. dissertation, Riga Technical University, Riga, 2013, p. 193.
2. A. A. Kolyshkin and R. Vaillancourt, “Analytical solution to eddy current testing of cylindrical problems with varying properties”, *Canadian Applied Mathematics Quarterly*, vol. 2, no. 3, pp. 349–360, 1994.
3. C. W. J. Nestor, C. V. Dodd, and W. E. Deeds, “Analysis and computer programs for eddy current coils concentric with multiple cylindrical conductors”, Oak Ridge National Laboratory, ORNL Report ORNL-5220, 1979.
4. E. Uzal, “Theory of eddy current inspection of layered metals”, Ph.D. dissertation, 1992.

## РОЗДІЛ 3

### АЛГОРИТМІЧНЕ І ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ ПРОФІЛІВ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МЕТОДОМ З АПРІОРНИМ НАКОПИЧЕННЯМ ДАНИХ

#### 3.1. Програмне забезпечення для “точного” моделювання процесів вихрострумового контролю в об’єктах циліндричної форми

Зазвичай для побудови точних електрофізичних моделей використовують...

#### 3.2. Програмне забезпечення для створення комп’ютерних однорідних планів експериментів

Для прикладу масштабування даних для реальних значень факторів взято базові значення з таблиці 3.1 і ...

*Таблиця 3.1*

**Вихідні дані для створення масштабованих планів експерименту**

	$\sigma_{51}$ , См/м	$\mu_{r51}$	$f$ , Гц	$r$ , мм
Базове значення (BaseValue)	6990000	10	2500	10
Максимальне відносне відхилення	15,00%	15,00%	20,00%	2,50%

*Таблиця 3.2*

**Приклад масштабованого чотирьохфакторного плану експерименту**

№	$\sigma_{51}$ , См/м	$\mu_{r51}$	$f$ , Гц	$r$ , мм
1	6,4852E+06	8,7095E+00	6,4852E+06	8,7095E+00
2	5,9705E+06	1,0419E+01	5,9705E+06	1,0419E+01

### Продовження таблиці 3.2

№	$\sigma_{51}$ , См/м	$\mu_{r51}$	$f$ , Гц	$r$ , мм
3	7,5557E+06	9,1286E+00	7,5557E+06	9,1286E+00
4	7,0410E+06	1,0838E+01	7,0410E+06	1,0838E+01
5	6,5262E+06	9,5476E+00	6,5262E+06	9,5476E+00
...	...	...	...	...
2498	6,3372E+06	1,1383E+01	6,3372E+06	1,1383E+01
2499	7,9224E+06	1,0092E+01	7,9224E+06	1,0092E+01
2500	7,4076E+06	8,8019E+00	7,4076E+06	8,8019E+00
2501	6,8929E+06	1,0511E+01	6,8929E+06	1,0511E+01
2502	6,3781E+06	9,2210E+00	6,3781E+06	9,2210E+00
...	...	...	...	...
4996	7,7743E+06	9,7658E+00	7,7743E+06	9,7658E+00
4997	7,2595E+06	1,1475E+01	7,2595E+06	1,1475E+01
4998	6,7448E+06	1,0185E+01	6,7448E+06	1,0185E+01
4999	6,2300E+06	8,8944E+00	6,2300E+06	8,8944E+00
5000	7,8153E+06	1,0604E+01	7,8153E+06	1,0604E+01

Наведений приклад показує...

### 3.3. Висновки до розділу 3

Алгоритмічне та програмне забезпечення для моделювання...

### 3.4. Список використаних джерел до розділу 3

## РОЗДІЛ 4

### ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПРОФІЛІВ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ КОНТРОЛЮ

#### 4.1. Апаратна частина комплексу

Однією з головних переваг підходу до розв'язку задачі...

- Генератор струму збудження, до якого входить генератор прямого цифрового синтезу (Direct digital synthesizer, DDS) та підсилювач сигналу сигнезатора. Він генерує синусоїдальний струм заданої частоти, який подається на обмотку збудження ВСП.
- ВСП з прохідним датчиком трансформаторного типу у вигляді двох котушок - котушки збудження та вимірювальної котушки.
- Модуль вимірювання параметрів...

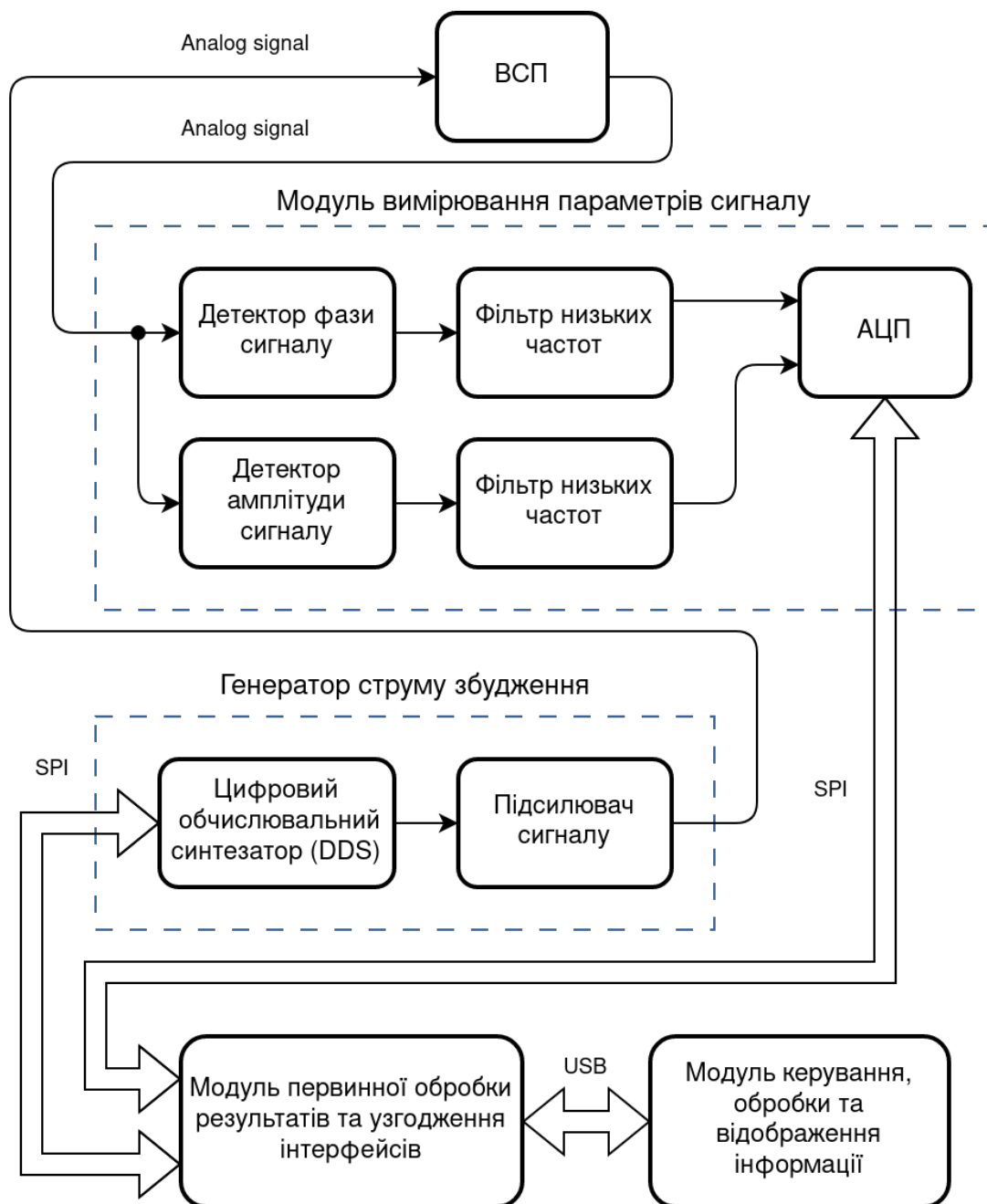


Рис. 4.1. Функціональна схема вихрострумового структуроскопу.

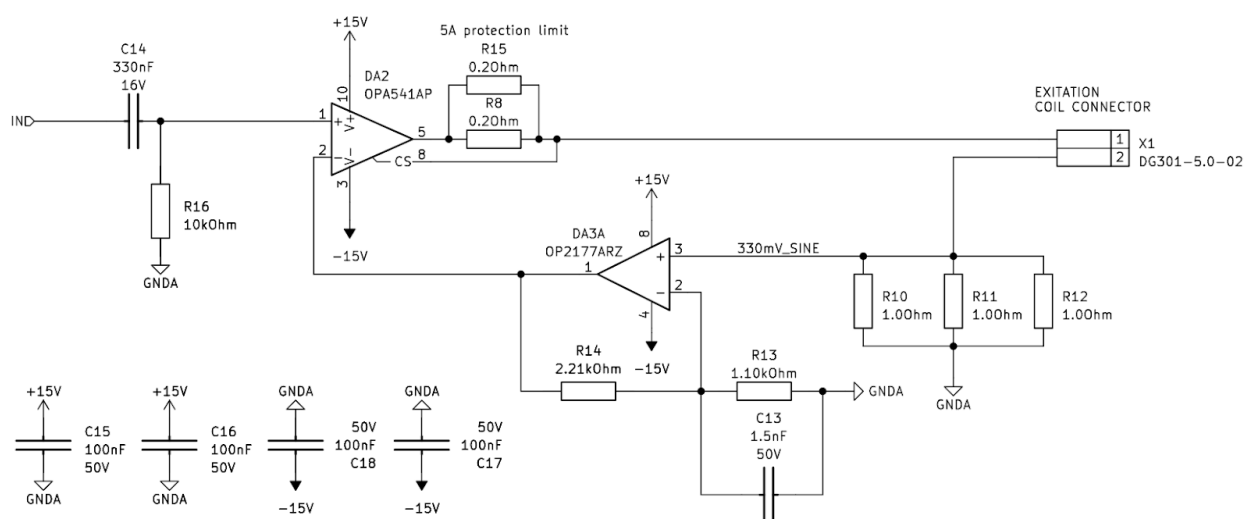


Рис. 4.2. Електрична принципова схема підсилювача сигналу збудження.

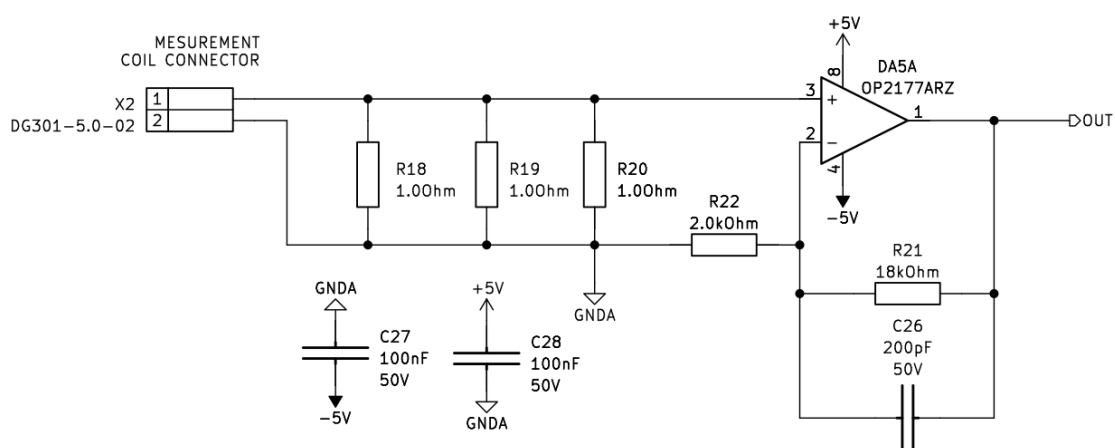


Рис. 4.3. Електрична принципова схема підсилювача сигналу ВСП.

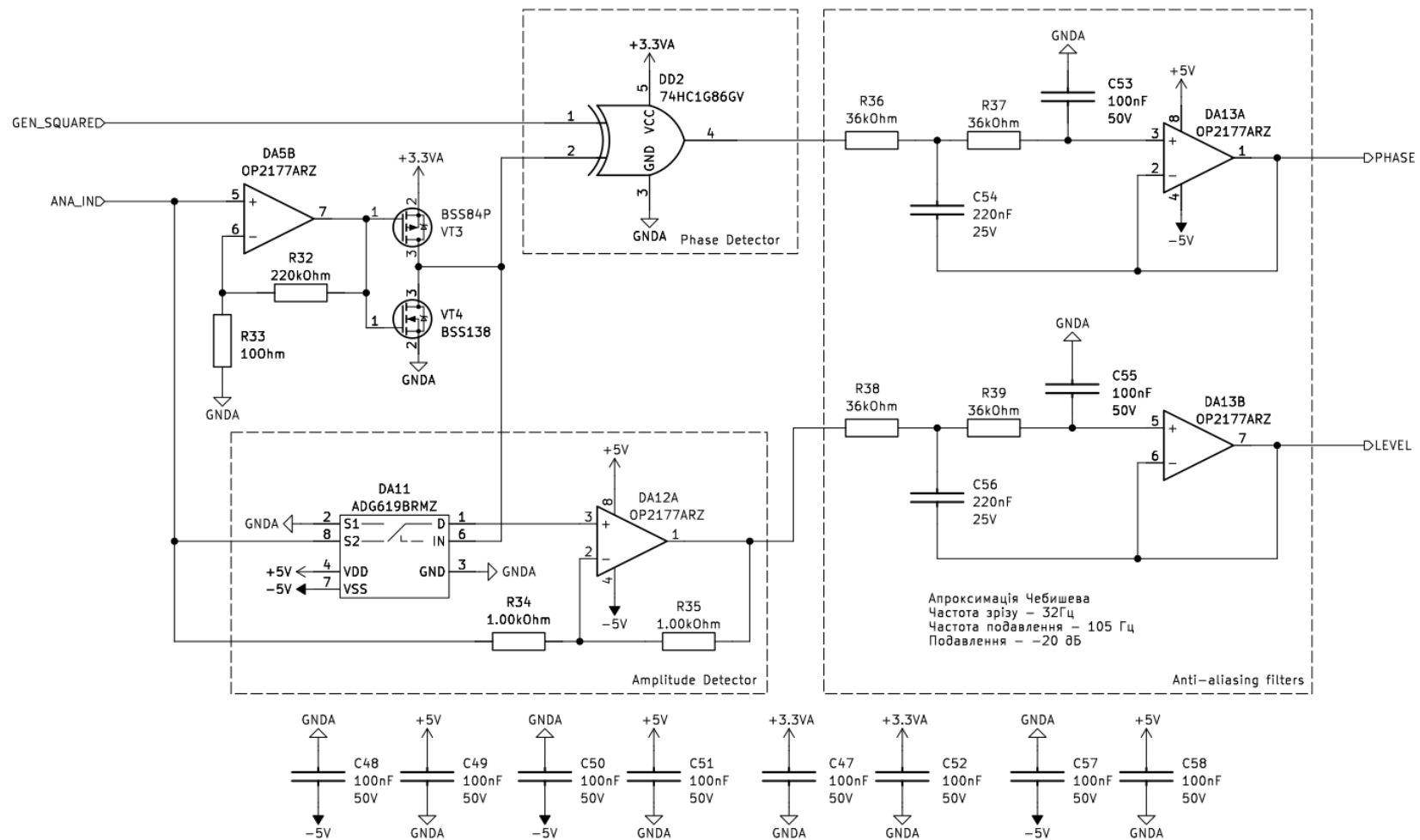


Рис. 4.4. Електричні принципи схеми фазового та амплітудного детектора сигналу ВСП з фільтрами низьких частот другого порядку.



## **4.2. Висновки до розділу 4**

Даний розділ присвячений опису...

## **4.3. Список використаних джерел до розділу 4**

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язана актуальна прикладна науково-технічна задача, яка має суттєве значення...

Головні результати дослідження, що отримано в ході розв'язання актуальної прикладної науково-технічної задачі, є наступними.

1. Проведений аналіз предметної області, а саме існуючих методів та засобів вимірювання приповерхневих профілів електрофізичних характеристик об'єктів контролю, виявлені їх недоліки та обґрунтовані перспективні нові підходи до підвищення швидкодії, ефективності та точності їх визначення. Також проведений аналіз відповідного математичного апарату ефективного розв'язання обернених задач вимірюваного неруйнівного контролю.
2. Проведено обґрунтування...

Отже, в результаті проведених досліджень створено новий...

## Додаток А

**Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про  
апробацію результатів дисертації**

**Список публікацій здобувача за темою дисертації**

1. V. Y. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, “Non-linear surrogate synthesis of the surface circular eddy current probes”, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 95, no. 9, pp. 76–82, 2019, Indexed in SCOPUS, Web of Science, EBSCO, INSPEC, BAZTECH. doi: 10.15199/48.2019.09.15. [Online]. Available: <http://pe.org.pl/articles/2019/9/15.pdf>.
2. В. Я. Гальченко, В. В. Тичков, А. В. Сторчак та Р. В. Трембовецька, “Відновлення приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об’єктів при вихрострумових вимірюваннях із наявністю апіорних даних. Формування вибірки для побудови сурогатної моделі”, *Український метрологічний журнал*, № 1, с. 35—50, 2020, Indexed in Web of Science. doi: 10.24027/2306-7039.1.2020.204226.
3. V. Y. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, “The construction of effective multidimensional computer designs of experiments based on a quasi-random additive recursive rd-sequence”, *Applied Computer Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 70–76, 2020, Indexed in Web of Science. doi: 10.2478/acss-2020-0009.
4. В. Я. Гальченко, А. В. Сторчак, Р. В. Трембовецька та В. В. Тичков, “Створення сурогатної моделі для відновлення приповерхневих профілів електрофізичних характеристик циліндричних об’єктів”, *Український*

- метрологічний журнал*, № 3, с. 27—35, 2020, Indexed in Web of Science. doi: 10.24027/2306-7039.3.2020.216824.
5. В. Я. Гальченко, А. В. Сторчак, В. В. Тичков та Р. В. Трембовецька, “Вимірювання приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об’єктів вихрострумовим методом із застосуванням апріорних даних”, *Український Метрологічний Журнал*, № 1, с. 5—11, 2022, Indexed in Web of Science, issn: 2306-7039. doi: 10.24027/2306-7039.1.2022.258678. url: <https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/4118>.
  6. R. V. Trembovetska, V. Y. Halchenko, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, “Linear synthesis of uniform anaxial eddy current probes with a volumetric structure of the excitation system”, *International Journal “NDT Days”*, vol. 3, no. 4, pp. 184–190, 2020, Фахове закордонне видання. [Online]. Available: <https://www.bg-s-ndt.org/journal/vol3/JNDTD-v3-n4-a01.pdf>.
  7. В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, В. В. Тичков та А. В. Сторчак, “Методи створення метамоделей: стан питання”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4 (151), с. 74—88, 2020, Фахове наукометричне видання, категорія Б. doi: 10.31649/1997-9266-2020-151-4-74-88.
  8. Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко, В. В. Тичков та А. В. Сторчак, “Оцінка точності нейромережових метамоделей кругових накладних вихрострумових перетворювачів”, *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 18—29, 2019, Фахове наукометричне видання, категорія Б. doi: 10.24025/2306-4412.2.2019.171272.
  9. A. V. Storchak and V. Y. Halchenko, “Research of eddy current processes of testing objects: Surface rectangular tangential probe”, in *Наукове видання Проблеми інформатизації: Тези доповідей п’ятої міжнародної науково-технічної конференції*, Cherkasy State Technological University (ChSTU), Черкаси, Баку, Бельсько-Бяла, Полтава, Nov. 13–15, 2017, p. 95.

10. А. В. Сторчак, В. В. Тичков, Р. В. Трембовецька та В. Я. Гальченко, “Нейромережеве моделювання в задачах відновлення електрофізичних параметрів циліндричних об’єктів при вихрострумовому контролі”, в *Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно-небезпечних об’єктах: Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених*, Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), Харків, 1—2 листоп. 2018, с. 71—73.
11. А. В. Сторчак, В. В. Тичков, Р. В. Трембовецька та В. Я. Гальченко, “Побудова математичної моделі прямої задачі в проблемі реконструкції електрофізичних параметрів циліндричних об’єктів контролю вихрострумовим методом”, в *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*, Ukrainian Society for Non-Destructive Testing (USNDT), т. 2, Lublin, Poland, 15—19 жовт. 2018, с. 50—51.
12. В. Я. Гальченко, В. В. Тичков, Р. В. Трембовецька та А. В. Сторчак, “Сурогатне моделювання в задачах ідентифікації параметрів об’єктів контролю”, в *Інформатика, математика, автоматика (ІМА-2019): науково-практична конференція*, Сумський державний університет (СДУ), Суми, 23—26 квіт. 2019, с. 189.
13. В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, В. В. Тичков та А. В. Сторчак, “Розв’язок ресурсоємних обернених задач електротехніки методами сурогатної оптимізації”, в *Фізика, електроніка, електротехніка (ФЕЕ-2019): науково-практична конференція*, Сумський державний університет (СДУ), Суми, 23—26 квіт. 2019, с. 135.
14. А. В. Сторчак, Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко та В. В. Тичков, “Комп’ютерне моделювання вихрострумового контролю багат шарових циліндричних виробів”, в *Обробка сигналів і негаусівських процесів: VII*

*Міжнародної науково-практичної конференції*, Черкаський державний технологічний університет (ЧДТУ), Черкаси, 23—24 трав. 2019, с. 179—182.

15. В. В. Тичков, Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко та А. В. Сторчак, “Постановка проблематики комп’ютерного моделювання вихрострумового контролю циліндричних провідних виробів”, в *Обробка сигналів і негасівських процесів: VII Міжнародної науково-практичної конференції*, Черкаський державний технологічний університет (ЧДТУ), Черкаси, 23—24 трав. 2019, с. 183—185.
16. А. В. Сторчак, Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко та В. В. Тичков, “Моделювання вихрострумового контролю циліндричних виробів із неперервним розподілом електрофізичних параметрів”, в *Датчики, прилади та системи—2019: VIII Міжнародна науково-технічна конференція*, ФОП Гордієнко Є. І., Черкаси, Херсон, Лазурне, 16—20 вер. 2019, с. 9—12.
17. А. В. Сторчак, В. Я. Гальченко, В. В. Тичков та Р. В. Трембовецька, “Аналіз досліджень щодо реконструкції електрофізичних параметрів об’єктів при вихрострумовому контролі”, в *Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно-небезпечних об’єктах: Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених*, Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), Харків, 4—5 листоп. 2019, с. 121—125.
18. А. В. Сторчак, В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька та В. В. Тичков, “Реконструкція профілів характеристик матеріалу циліндричних об’єктів шляхом розв’язку оберненої задачі вихрострумового вимірювального контролю”, в *Information Technologies in Education, Science and Technology (ITEST-2020): V International Scientific-Practical Conference*, Черкаський державний технологічний університет (ЧДТУ), Черкаси, 21—23 трав. 2020, с. 34—36.

19. В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, В. В. Тичков та А. В. Сторчак, “Побудова ефективних багатовимірних комп’ютерних планів експерименту”, в *Information Technologies in Education, Science and Technology (ITEST-2020): V International Scientific-Practical Conference*, Черкаський державний технологічний університет (ЧДТУ), Черкаси, 21—23 трав. 2020, с. 116—121.
20. Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко, В. В. Тичков та А. В. Сторчак, “Методи побудови метамоделей для сурогатної оптимізації”, в *Інформатика, математика, автоматика (ІМА-2020): науково-практична конференція*, Сумський державний університет (СДУ), Суми, 20—24 квіт. 2020, с. 243—244.
21. В. В. Тичков, А. В. Сторчак, В. Я. Гальченко та Р. В. Трембовецька, “Ідентифікація електрофізичних характеристик об’єктів із використанням «м’яких обчислень»”, в *Фізика, електроніка, електротехніка (ФЕЕ-2020): науково-практична конференція*, Сумський державний університет (СДУ), Суми, 20—24 квіт. 2020, с. 143—144.
22. В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, В. В. Тичков та А. В. Сторчак, “Аналіз методів розв’язку нелінійних обернених задач та їх застосування до проектування вихрострумових перетворювачів”, в *XXI Міжнародна конференція з математичного моделювання (МКММ-2020)*, Херсонський національний технічний університет (ХНТУ), Херсон, 14—18 вер. 2020, с. 44.
23. V. V. Tychkov, V. Y. Halchenko, and A. V. Storchak, “Neurocomputing with tandem architecture”, in *Проблеми інформатизації: Восьма Міжнародна науково-технічна конференція*, Cherkasy, Kharkiv, Baku, Bielsko-Biala, Nov. 26–27, 2020, p. 97.
24. Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко, В. В. Тичков та А. В. Сторчак, “Синтез об’ємних структур системи збудження вихрострумових перетворювачів”, в *Матеріали XV міжнародної конференції “Контроль і управління в*

- складних системах (КУСС-2020)”,* Вінницький національний технічний університет (ВНТУ), Вінниця, 8—10 жовт. 2020. url: <http://ir.lib.vntu.edu.ua//handle/123456789/30647>.
25. А. В. Сторчак, В. Я. Гальченко, В. В. Тичков та Р. В. Трембовецька, “Інверсія штучних нейронних мереж в обернених задачах вихрострумової структуроскопії”, в *Матеріали XV міжнародної конференції ”Контроль і управління в складних системах (КУСС-2020)”*, Вінницький національний технічний університет (ВНТУ), Вінниця, 8—10 жовт. 2020. url: <http://ir.lib.vntu.edu.ua//handle/123456789/30624>.
26. В. В. Тичков, А. В. Сторчак, В. Я. Гальченко та Р. В. Трембовецька, “Застосування нейромережі з «тандем»-архітектурою для розв’язку оберненої задачі при вихрострумовому вимірювальному контролі”, в *Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві: Міжнародна науково-практична on-line конференція*, Кропивницький державний технічний університет (КДТУ), Кропивницький, 11—12 листоп. 2020, с. 148—150.
27. А. В. Сторчак та В. Я. Гальченко, “Система вихрострумового вимірювання приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об’єктів”, в *Датчики, прилади та системи–2024: VIII Міжнародна науково-технічна конференція*, збірник праць, Черкаський державний технологічний університет (ЧДТУ), Черкаси, 30—31 трав. 2024, с. 56—59.

#### **А.1. Відомості про апробацію результатів дисертації**

Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та підлягали обговоренню на таких Міжнародних та Всеукраїнських наукових конференціях: XV-та міжнародна конференція «Контроль і управління в складних системах», (м. Вінниця, 2020); Міжнародний симпозіум «Проблеми еле-



ктроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (м. Харків, 2020); Міжнародна конференція «Дни на безразрушителния контрол» (м. Созополь, Болгарія, 2020); Міжнародна науково-практична on-line конференція «Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві» ( м. Кропивницький, 2020); Міжнародних симпозіумах «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (м. Харків, 2020 та 2023); XI Міжнародна науково-технічна конференція «Датчики, прилади та системи» (м. Черкаси, 2024).

Основні результати дослідження доповідалися на наукових конференціях різного рівня. Це такі конференції:

- V Міжнародній науково-практичній конференції ”Інформаційні технології в освіті, науці і техніці” (ІТОНТ-2020) Черкаси, 21–22 травня 2020 р., онлайн доповідь;
- XV Міжнародна конференція ”Контроль і управління в складних системах” (КУСС-2020) Вінниця, 8–10 жовтня 2020 р., онлайн доповідь;
- ...

Додаток Б

**Акти впровадження**

