

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 вихрострумowego 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 вихрострумowego контролю і експрес методу з застосуванням дворівневих Lookup tables.

Як відомо, в приповерхневих шарах циліндричних металевих деталей в результаті їх термічної чи термохімічної обробки, такої як гартування, азотування, цементация тощо, відбувається зміна мікроструктури матеріалу. Характеристики цього матеріалу: в'язкість, пластичність, твердість та міцність, а також фазовий та хімічний склад мають кореляційні зв'язки з розподілами електричної провідності та магнітної проникності, тобто їх профілями. 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.

У першому розділі подано огляд застосування вже наявних та перспективних для створення нових основних засобів і методів для розв'язку обернених

задач. Проаналізовано можливість застосування приведених підходів та методів для вихрострумових вимірювань в контексті теми дисертаційного дослідження.

В дослідженні було обрано підхід з застосуванням сурогатних моделей для розв'язку оберненої задачі, тож було зроблено детальний аналіз методів побудови цих моделей. Виділено та наголошено на перевагах евристичних сурогатних моделей на основі штучних нейронних мереж. Такі сурогатні моделі забезпечують високу швидкодію та точність при необхідності апроксимації складних нелінійних функцій з великою кількістю входів.

Для створення адекватної сурогатної моделі та наступного розв'язку оберненої задачі є необхідним оптимальний план комп'ютерного експерименту, щоб рівномірно дослідити поверхню відгуку досліджуваної моделі, топологія поверхні відгуку якої апріорі не є відомою. Тож в дисертації було описано приклади таких оптимальних планів, що можна отримати за допомогою квазі-випадкових послідовностей. Плани експерименту, сформовані за такими послідовностями, забезпечують однорідність розподілу і поліпшення точності числових експериментів, що на пряму впливає на швидкість та якість створення сурогатних моделей.

В другому розділі запропоновано універсальний підхід до створення сурогатної моделі за допомогою глибоких нейронних мереж, що дозволяє відмовитися від ряду ресурсозатратних обчислень з використанням “точної” високовартісної моделі.

Запропоновано метод створення однорідних комп'ютерних планів експериментів на основі  $R$  послідовностей, що дозволяє реалізувати адекватну багатофакторну сурогатну модель для оригінальної моделі зі складною топографією відгуку та накопиченням апріорної інформації щодо об'єкту контролю.

Рекомендовано засоби створення варіантів-кандидатів для розв'язку задачі за допомогою запропонованої сурогатної моделі.

Створено новий багатопараметровий експрес-метод вихрострумового вимірювання радіальних приповерхневих профілів електрофізичних параметрів циліндричних об'єктів контролю в реальному масштабі часу.

Третій розділ включає в себе опис розробленого алгоритмічного та програмного забезпечення для моделювання та реалізації процесу вимірювання профілів електрофізичних характеристик приповерхневого матеріалу циліндричних об'єктів контролю.

Показано результати обчислень за обраною “точною” аналітичною моделлю при верифікації порівнянням з числовим методом скінченних елементів (COMSOL Multiphysics) та двома іншими спрощеними аналітичними моделями. Комп'ютерна модель вихрострумового контролю циліндричних об'єктів була реалізована на мові програмування Python 3. Приведено приклади створення однорідних комп'ютерних планів експериментів на R послідовностях для дво-, трьо- і чотиривимірних наборів з 5000 точками. Значення центральної розбіжності такого плану експерименту складало  $2,84993\text{E-}07$  та циклічної розбіжності становило 3,55556.

Запропоновано метод створення вибірок для планів експериментів зі зміною профілів електрофізичних характеристик в приповерхневому шарі об'єкту контролю при апроксимації такої зміни відповідно до різних форм функціональних залежностей. В середовищі програмування Python 3 створена сурогатна модель на основі глибоких нейронних мереж з використанням відкритої бібліотеки Keras (Tensorflow backend). При перевірці сурогатних моделей на адекватність значення коефіцієнту детермінації  $R^2$  становило 0.999578 та 0.9997864, а MAPE дорівнювало 0,039814% і 0,026852% для дійсної та уявної складових напруги відповідно.

Завдяки своїм узагальнюючим властивостям та здатністю бути носієм апріорної інформації про процес контролю, нейромережі є засобами апроксимації з прийнятною точністю, що значно заощаджують час в отриманні результату і підвищують якість подальших експериментів в дослідженнях.



Показано приклад застосування дворівневих Lookup tables для розв'язку оберненої вимірювальної задачі визначення профілів. Описано алгоритм формування динамічної таблиці другого рівня з уточненими значеннями.

Обчислювальна технологія розв'язку оберненої вимірювальної задачі продемонстрована на конкретному прикладі, проте є можливим застосування такого підходу з іншими планами експерименту, іншими функціями апроксимації електрофізичних параметрів та іншими сурогатними моделями й таблицями пошуку. Математично цей метод оснований на винятковій здатності швидкого розв'язку рівнянь Максвела без фактичного явного виконання такого розв'язку завдяки апроксимації глибокими нейронними мережами точної моделі вихрострумового контролю та використання таблиць пошуку для швидкого визначення профілів електричної провідності та магнітної проникності.

Четвертий розділ присвячений опису апаратної частини приладу для вихрострумових вимірювань та особливостям використання методу Lookup tables з застосуванням динамічної таблиці другого рівня як засобу розв'язку оберненої задачі визначення радіальних профілів електричної провідності та магнітної проникності циліндричних об'єктів контролю. Приведено варіанти схемотехнічних рішень і описано особливості створення спеціалізованого вихрострумового структуроскопа для визначення електрофізичних характеристик об'єктів контролю. А також описано приклади використання алгоритму розв'язку оберненої вимірювальної задачі з застосуванням Lookup tables.

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 технології Lookup tables для швидкого пошуку цих розподілів по результатам однократного вимірювання прохідним вихро-

струмовим перетворювачем системи контролю використовується додатково додана згенерована динамічним способом із застосуванням високопродуктивної сурогатної моделі з апіорним накопиченням інформації таблиця другого рівня, що дозволило забезпечити одночасне сумісне визначення профілів у реальному масштабі часу із більш високою чим у первинній LUT-таблиці точністю реконструкції профілів;

- вперше виконано обґрунтування та розроблення низки комп'ютерних однорідних планів експериментів, які відрізняються їх створенням на основі квазівипадкових R-послідовностей Робертса та введенням в них додаткової надлишкової апіорної інформації щодо врахування кожного окремо та всієї сукупності разом найбільш вагомих для формування сигналу вихрострумового перетворювача факторів, що дозволило завдяки покращеній об'ємній гомогенності планів та всіх їх 2D-проекцій із гарантовано низькими показниками центрованої та циклічної розбіжностей забезпечити, окрім створення максимально сприятливих умов для точної побудови нейромережевої сурогатної моделі, завчасне накопичення в них в числовому вигляді вичерпної інформації щодо прозорого відображення в моделі прихованих закономірностей, притаманних процесу вихрострумового вимірювання;
- вперше створено метод побудови сурогатної моделі процесу вихрострумового контролю циліндричних об'єктів прохідними трансформаторними перетворювачами, який відрізняється реалізацією її на основі двох дійснозначних повнозв'язних глибоких нейронних мереж із загальними входами та роздільними виходами окремо для дійсної та уявної частин ЕРС перетворювача, тобто результатом розщеплення однієї комплексозначної нейромережі, та виконанням нею також функцій носія і накопичувача апіорної інформації, що дало можливість, окрім високоточної апроксимації електродинамічної

моделі, фактично внаслідок швидкого розв'язку рівнянь Максвела, причому без явної інформації щодо них та методах їх розв'язання, з високою обчислювальною продуктивністю в реальному масштабі часу динамічно створювати таблиці другого рівня в методі Lookur tables для забезпечення необхідної точності відтворення профілів.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень дисертації впроваджені в навчальних процесах кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету; кафедри виробництва приладів приладобудівного факультету НТУУ “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”. Вони також використовуються у діяльності промислових підприємств ТОВ “АР-МАНД ТРЕЙД” (м. Черкаси); АТ “УКРЗАЛІЗНИЦЯ”, служба вагонного господарства, виробничий підрозділ “ЕКСПЛУАТАЦІЙНЕ ВАГОННЕ ДЕПО ЗНАМ'ЯНКА” (м. Знам'янка, Кіровоградська область), про що свідчать відповідні акти впровадження.

*Ключові слова:* вихрострумове вимірювання, моніторинг, циліндричний об'єкт контролю, радіальні профілі магнітної проникності і електричної провідності, сурогатна модель, нейромережа, однорідний комп'ютерний план експерименту, квазі-випадкові послідовності, експрес метод, динамічна таблиця другого рівня.

## 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 and the express method using two-level Lookup tables.

It is known that the surface layers of cylindrical metal parts undergo changes in the microstructure of the material as a result of thermal or thermochemical treatment, such as quenching, nitriding, cementation, etc. The characteristics of this material: viscosity, flexibility, hardness, and strength, as well as phase and chemical composition, are correlated with the distributions of electrical conductivity and magnetic permeability, i.e., their profiles. Therefore, it is advisable to use encircling eddy-current probes, whose measurements allow us to reproduce the radial profiles of electrical conductivity and magnetic permeability as a result of solving the inverse electrodynamic problem.

The first section provides an overview of the use of existing and promising tools and methods for solving inverse problems. The possibility of applying the above approaches and methods for eddy current measuring in the context of the topic of the dissertation is analyzed.

The study chose the approach of using surrogate models to solve the inverse problem, so a detailed analysis of the methods of building these models was made. The advantages of heuristic surrogate models based on artificial neural networks are highlighted and emphasized. Such surrogate models provide high performance and accuracy when it is necessary to approximate complex nonlinear functions with numerous inputs.

In order to create an adequate surrogate model and subsequently solve the inverse problem, an optimal computer design of experiment is required to uniformly investigate the response surface of the model under study, the topology of which is not known apriori. Therefore, this dissertation describes examples of such optimal designs that can be obtained using quasi-random sequences. Designs of experiments based on such sequences ensure uniformity of distribution and improve the accuracy of numerical experiments, which directly affects the speed and quality of surrogate model creation.

The second section proposes a universal approach to creating a surrogate model using deep neural networks, which allows to abandon a number of resource-intensive computations using an “exact” expensive model.

A method of creating uniform computer designs of experiments based on R sequences is proposed, which allows to implement an adequate multifactorial surrogate model for the original model with a complex response topography and accumulation of apriori information about the test object.

The means of creating candidate-variants for solving the problem using the proposed surrogate model are recommended.

A new multiparameter express-method of eddy current measurement of radial subsurface profiles of electrophysical properties of cylindrical test objects in real time has been developed.

The third section includes a description of the developed algorithmic and software for modeling and implementing the process of measuring the profiles of electrophysical properties of the subsurface material of cylindrical test objects.

The results of computations using the selected “exact” analytical model are shown in comparison with numerical finite element method (COMSOL Multiphysics) and two other simplified analytical models. The computer model of eddy current testing of cylindrical objects was implemented in the Python 3 programming language. Examples of creating uniform computer designs of experiments on R sequences for two-, three-, and four-dimensional sets with 5000 points are given. The value of the centered discrepancy of this experimental design was  $2.84993\text{E-}07$  and the wrap-around discrepancy was 3.55556.

A method is proposed for creating samples for designs of experiments with changes in the profiles of electrophysical characteristics in the subsurface layer of the test object when such changes are approximated according to various forms of functional dependencies. A surrogate model based on deep neural networks was created in the Python 3 programming environment using the open source Keras library (Tensorflow backend). Checking the surrogate models for adequacy, the values of the determination coefficient  $R^2$  were 0.999578 and 0.9997864, and the MAPE was 0.039814% and 0.026852% for the real and imaginary components of the voltage, respectively.

Due to their generalizing properties and the ability to be a carrier of apriori information about the testing process, neural networks are approximation tools with acceptable accuracy that significantly save time in obtaining results and improve the quality of further experiments in research. An example of using two-level Lookup tables to solve the inverse measurement problem of determining profiles is shown. The algorithm for forming a dynamic table of the second level with updated values is described.

The computational technology for solving the inverse measurement problem is demonstrated on a specific example, but it is possible to apply this approach with other designs of experiment, other functions for approximating electrophysical parameters, and other surrogate models and lookup tables. Mathematically, this method is based on the exceptional ability to quickly solve Maxwell’s equations

without actually explicitly performing such a solution due to the approximation of exact eddy current testing model by deep neural networks and the use of lookup tables to quickly determine the profiles of electrical conductivity and magnetic permeability.

The fourth chapter is devoted to the description of the hardware of the eddy current measurement device and the peculiarities of using the Lookup tables method with the use of a dynamic table of the second level as a means of solving the inverse problem of determining the radial profiles of electrical conductivity and magnetic permeability of cylindrical test objects. Variants of schematic solutions are presented and the peculiarities of creating a specialized eddy current structuroscope for determining the electrophysical properties of the test objects are described. Examples of using the algorithm for solving an inverse measurement problem based on Lookup tables are also described.

The following results were obtained in the course of fulfilling the tasks set:

- first developed an express-method for measuring radial subsurface profiles of electrical conductivity and magnetic permeability in cylindrical objects, which differs in that when using Lookup tables technology to rapidly search for these distributions based on the results of a single measurement by a encircling eddy current probe of the test system, an additional second-level table generated dynamically using a high-performance surrogate model with apriori information accumulation is used, which allowed for simultaneous joint determination of profiles in real time with higher profile reconstruction accuracy than in the primary LUT table;
- first a number of computer uniform design of experiments were substantiated and developed, which are distinguished by their creation on the basis of quasi-random Roberts R-sequences and the inclusion of additional excessive a priori information to take into account each individually and the entire set of factors that are most important for the formation of the eddy current probe signal, which made it possible, due to the improved volumet-

ric homogeneity of the DOE and all their 2D projections with guaranteed low indicators of centered and wrap-around discrepancy, to ensure, in addition to creating the most favorable conditions for the accurate construction of a neural network surrogate model, to pre-storage comprehensive information in the numerical form to transparent display in the model hidden patterns inherent of the eddy current measurement process;

- first developed a method for constructing a surrogate model of the process of eddy current testing of cylindrical objects by encircling transformer probes, which is characterized by its implementation on the basis of two real-valued fully connected deep neural networks with common inputs and separate outputs for the real and imaginary parts of the probe EMF, i.e., the result of splitting one complex-valued neural network, and performing the functions of a carrier and accumulator of a priori information, which made it possible, in addition to a highly accurate approximation of the electrodynamic model, in fact, due to the rapid solution of Maxwell's equations, without explicit information about them and methods of their solution, to dynamically create second-level tables in the Lookup tables method with high computational performance in real time to ensure the required accuracy of profiles reproduction.

The results of the theoretical and experimental research of the dissertation are implemented in the educational processes of the Department of Instrumentation, Mechatronics and Computerized Technologies of Cherkasy State Technological University; Department of Instrumentation Production of the Faculty of Instrumentation of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. They are also used in the activities of industrial enterprises LLC «ARMAND TRADE» (Cherkasy); JSC «Ukrzaliznytsia», carriage service, production unit «Znamenka Operational Carriage Depot» (Znamenka, Kirovohrad region), as evidenced by the relevant implementation acts.



*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, quasi-random sequences, express method, second level dynamic table.

### Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. V. Y. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, “Nonlinear 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 вихрострумowego контролю циліндричних провідних виробів”, в *Обробка сигналів і негаусівських 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 вихрострумowego 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 вихрострумовой 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 вихрострумowego 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 вихрострумівих 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 вихрострумівих 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.

## ЗМІСТ

<b>Перелік умовних позначень</b>	<b>22</b>
<b>Вступ</b>	<b>24</b>
Список використаних джерел до вступу . . . . .	34
<b>Розділ 1. Огляд методів та засобів розв’язку задачі встановлення структурних особливостей матеріалу циліндричних об’єктів контролю</b>	<b>40</b>
1.1. Огляд методів визначення електрофізичних характеристик об’єктів вихрострумовим методом . . . . .	40
1.2. Огляд методів створення сурогатних моделей із накопиченням апріорних даних . . . . .	49
1.2.1. Геометричні сурогатні моделі . . . . .	52
1.2.2. Стохастичні сурогатні моделі . . . . .	54
1.2.3. Евристичні моделі . . . . .	56
1.3. Аналіз методів створення комп’ютерних однорідних планів експериментів . . . . .	63
1.4. Огляд методів застосування штучних нейронних мереж для розв’язку обернених задач . . . . .	67
1.4.1. Особливості розв’язку обернених задач з використан- ням нейромереж . . . . .	67
1.4.2. Тандемна нейронна мережа . . . . .	70
1.4.3. Генеративна змагальна мережа . . . . .	71
1.4.4. Автокодувальники та варіаційні автокодувальники . .	73
1.4.5. Інверсійні нейронні мережі . . . . .	76

1.4.6. Гібридні методи оптимізації з глибокими нейронними мережами . . . . .	77
1.5. Висновки до розділу 1 . . . . .	80
1.6. Список використаних джерел до розділу 1 . . . . .	81
<b>Розділ 2. Метод вимірювання профілів електрофізичних параметрів матеріалу циліндричних об'єктів з апіорним накопиченням даних</b>	<b>98</b>
2.1. Концептуальна постановка задачі . . . . .	98
2.2. “Точна” електродинамічна модель процесу вимірювання вихрострумовим перетворювачем електрофізичних параметрів циліндричних об'єктів контролю . . . . .	101
2.3. Створення сурогатної моделі процесу контролю з апіорним накопиченням інформації . . . . .	105
2.4. Метод створення однорідних планів експериментів на R послідовностях Робертса . . . . .	109
2.5. Експрес метод розв'язку оберненої задачі вимірювання . . . . .	113
2.6. Висновки до розділу 2 . . . . .	114
2.7. Список використаних джерел до розділу 2 . . . . .	115
<b>Розділ 3. Алгоритмічне і програмне забезпечення для вимірювань профілів електрофізичних параметрів методом з апіорним накопиченням даних</b>	<b>119</b>
3.1. Програмне забезпечення для “точного” моделювання процесів вихрострумового контролю в об'єктах циліндричної форми . . . . .	119
3.2. Програмне забезпечення для створення комп'ютерних однорідних планів експериментів . . . . .	126
3.3. Програмні засоби створення сурогатної моделі . . . . .	138
3.4. Розв'язок обернених вимірювальних задач вихрострумової структуроскопії методом Lookup Tables . . . . .	145



3.5. Висновки до розділу 3 . . . . .	152
3.6. Список використаних джерел до розділу 3 . . . . .	154
<b>Розділ 4. Програмно-апаратний комплекс для вимірювання профілів електрофізичних параметрів циліндричних об'єктів контролю</b>	<b>156</b>
4.1. Апаратна частина комплексу . . . . .	156
4.2. Особливості технології виконання вимірювань в реальному масштабі часу . . . . .	166
4.3. Висновки до розділу 4 . . . . .	176
4.4. Список використаних джерел до розділу 4 . . . . .	177
<b>Висновки</b>	<b>179</b>
<b>Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації</b>	<b>184</b>
A.1. Відомості про апробацію результатів дисертації . . . . .	189
<b>Додаток Б. Акти впровадження</b>	<b>192</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 однорідних планів експериментів (ПЕ) з гарантовано низькими показниками розбіжностей на основі квазівипадкових R-послідовностей Робертса, що забезпечують введення апріорної інформації щодо умов вимірювань профілів ОК з врахуванням найбільш впливових факторів;

- створення засобів формування навчальних вибірок для побудови сурогатної моделі на основі «точної» математичної моделі фізичного процесу взаємодії електромагнітного поля з циліндричними ОК та однорідних ПЕ;
- розроблення методу створення апроксимаційної нейромережевої сурогатної моделі процесу вихрострумowego контролю циліндричних ОК прохідними трансформаторними перетворювачами, що є високопродуктивним засобом для швидкого розв'язку оберненої вимірювальної задачі визначення профілів, в тому числі як носій і накопичувач апіорної інформації;
- розроблення експрес-методу та апаратної і програмної складових системи для вимірювання профілів ЕП та МП у масштабі реального часу;
- впровадження результатів досліджень в практику промислових підприємств.

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

**Предмет дослідження** — вихрострумова система та експрес-метод вимірювання приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об'єктів прохідними перетворювачами.

В процесі реалізації поставлених завдань були застосовані наступні **методи досліджень**: для опису процесів вихрострумowego 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 нейромережевих сурогатних моделей – теорія оптимізації, методи штучного інтелекту, методи машинного навчання, методи ма-

тематичної 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 технології Lookup tables для швидкого пошуку цих розподілів по результатам однократного вимірювання прохідним вихрострумовим перетворювачем системи контролю використовується додатково додана згенерована динамічним способом із застосуванням високопродуктивної сурогатної моделі з апіорним накопиченням інформації таблиця другого рівня, що дозволило забезпечити одночасне сумісне визначення профілів у реальному масштабі часу із більш високою чим у первинній LUT-таблиці точністю реконструкції профілів;
- вперше виконано обґрунтування та розроблення низки комп'ютерних однорідних планів експериментів, які відрізняються їх створенням на основі квазівипадкових R-послідовностей Робертса та введенням в них додаткової надлишкової апіорної інформації щодо врахування кожного окремо та всієї сукупності разом найбільш вагомих для формування сигналу вихрострумового перетворювача факторів, що дозволило завдяки покращеній об'ємної гомогенності планів та всіх їх 2D-проекцій із гарантовано низькими показниками центрованої та циклічної розбіжностей забезпечити, окрім створення максимально сприятливих умов для точної побудови нейромережевої сурогатної моделі, завчасне накопичення в них в числовому вигляді вичерпної



- інформації щодо прозорого відображення в моделі прихованих закономірностей, притаманних процесу вихрострумowego вимірювання;
- вперше створено метод побудови сурогатної моделі процесу вихрострумowego контролю циліндричних об'єктів прохідними трансформаторними перетворювачами, який відрізняється реалізацією її на основі двох дійснозначних повнозв'язних глибоких нейронних мереж із загальними входами та роздільними виходами окремо для дійсної та уявної частин ЕРС перетворювача, тобто результатом розщеплення однієї комплексозначної нейромережі, та виконанням нею також функцій носія і накопичувача апіорної інформації, що дало можливість, окрім високоточної апроксимації електродинамічної моделі, фактично внаслідок швидкого розв'язку рівнянь Максвела, причому без явної інформації щодо них та методах їх розв'язання, з високою обчислювальною продуктивністю в реальному масштабі часу динамічно створювати таблиці другого рівня в методі Look up tables для забезпечення необхідної точності відтворення профілів.

#### **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;
- розроблено програмний комплекс для комп'ютерного моделювання за «точною» електродинамічною моделлю процесу вихрострумowego контролю циліндричних об'єктів прохідними трансформаторними вихрострумовими перетворювачами;
- розроблено в програмному вигляді продуктивну в обчислювальному сенсі сурогатну модель процесу вихрострумових вимірювань при контролі циліндричних ОК, тобто моделі на «точну» електродинамі-

чну модель, яка дозволяє значно скоротити час проведення числових розрахунків і слугує основою для отримання розв'язку оберненої вимірювальної задачі;

- створено програмні засоби дворівневого LUT для одночасного вирішення проблем швидкості та забезпечення точності пошуку у попередньо обчислених довідникових таблицях із обмеженим набором, синтезованих внаслідок моделювання, профілів ЕП та МП, що дозволяють розв'язок оберненої задачі визначення радіальних профілів електрофізичних характеристик приповерхневого матеріалу об'єктів контролю в реальному масштабі часу;
- запропоновано схемотехніку основних вузлів вихрострумowego структуроскопа.

**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 приладобудівного факультету НТУУ “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”. Вони також використовуються у діяльності промислових підприємств ТОВ “АРМАНД ТРЕЙД” (м. Черкаси); АТ “УКРЗАЛІЗНИЦЯ”, служба вагонного господарства, виробничий підрозділ “ЕКСПЛУАТАЦІЙНЕ ВАГОННЕ ДЕПО ЗНАМ’ЯНКА” (м. Знам’янка, Кіровоградська область), що підтверджено відповідними актами впровадження.

**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 вихрострумowych 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; у [5] - запропоновано експрес метод пошуку профілів в таблицях зі довідниковими зразками; у [6] - створення комп'ютерного однорідного квазі-плану експерименту; у [7] - обчислення інформативності та адекватності MLP сурогатної моделі; у [8] - розраховані статистичні показники для оцінки адекватності та інформативності метамodelей накладного кругового вихрострумowego перетворювача для однієї із трьох декомпозиційних підобластей; у [9] - створення програм обчислення сигналу від вихрострумowego перетворювача, проведення числових розрахунків; у [10]—[13] - проведено пошук та аналіз інформації про створення сурогатних modelей на основі глибоких нейромереж, проведено серію числових експериментів; [14]—[17] - створено програми для обчислення сигналу вихрострумowego перетворювача на основі «точної» електродинамічної моделі, проведена їх верифікація; [18]—[20] - створено нейромережеву сурогатну модель процесу вихрострумowego контролю об'єктів прохідним вихрострумowym перетворювачем; [21]—[24] - проведена частина числових експериментів та аналіз результатів дослідження; [25], [26] - формування частини вибірок квазі випадкових послідовностей та розрахунок їх статистичних показників; [27] - проведені числові експерименти та аналіз їх результатів.

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та підлягали обговоренню на таких Міжнародних та Всеукраїнських наукових конференціях: 5-та Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми інформатизації» (м. Черкаси – Баку – Бельсько-Бяла – Полтава, 2017); Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно-небезпечних об'єктах» (м. Харків, 2018); 2-nd scientific conference with international participation «Non-

Destructive Testing in Context of the Associated Membership of Ukraine in the European Union» (Poland, Lublin, 2018); науково-практична конференція «Інформатика, математика, автоматика» (м. Суми, 2019); науково-практична конференція «Фізика, електроніка, електротехніка» (м. Суми, 2019); VII-ма Міжнародна науково-практична конференція «Обробка сигналів і негаусівських процесів» (м. Черкаси, 2019); VIII-ма Міжнародна науково-технічна конференція «Датчики, прилади та системи» (м. Черкаси – Херсон – Лазурне, 2019); Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно-небезпечних об'єктах» (м. Харків, 2019); V-th International Scientific-Practical Conference «Information Technologies in Education, Science and Technology» (Cherkasy, 2020); науково-практична конференція «Інформатика, математика, автоматика» (м. Суми, 2020); науково-практична конференція «Фізика, електроніка, електротехніка» (м. Суми, 2020); XXI-а Міжнародна конференція з математичного моделювання (м. Херсон, 2020); Восьма Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми інформатизації» (м. Черкаси – Харків - Баку – Бельско-Бяла, 2020); 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.;
- Міжнародний симпозіум "Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки" (SIEMA'2020) Харків, 29–30 жовтня 2020 р.;
- Міжнародної науково-практичної on-line конференції "Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві" Кропивницький, 11–12 листопада 2020 р.;
- XI Міжнародна науково-технічна конференція "Датчики, прилади та системи" (ДПС-2024) Черкаси, 30–31 травня 2024 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, “Nonlinear 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 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 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. 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.
12. 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>.
13. 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 сільсько-му господарстві: Міжнародна науково-практична on-line конференція*, Кропивницький державний технічний університет (КДТУ), Кропивницький, 11—12 листоп. 2020, с. 148—150.
14. 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.
15. А. В. Сторчак, Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко та В. В. Тичков, “Комп’ютерне моделювання вихрострумового контролю багатошарових циліндричних виробів”, в *Обробка сигналів і негаусівських процесів: VII Міжнародної науково-практичної конференції*, Черкаський держав-



- ний технологічний університет (ЧДТУ), Черкаси, 23—24 трав. 2019, с. 179—182.
16. 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 негаусівських процесів: VII Міжнародної науково-практичної конференції*, Черкаський державний технологічний університет (ЧДТУ), Черкаси, 23—24 трав. 2019, с. 183—185.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
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. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.

26. Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко, В. В. Тичков та А. В. Сторчак, “Синтез об’ємних структур системи збудження вихрострумів 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>.
27. А. В. Сторчак та В. Я. Гальченко, “Система вихрострумівого 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.

## 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.

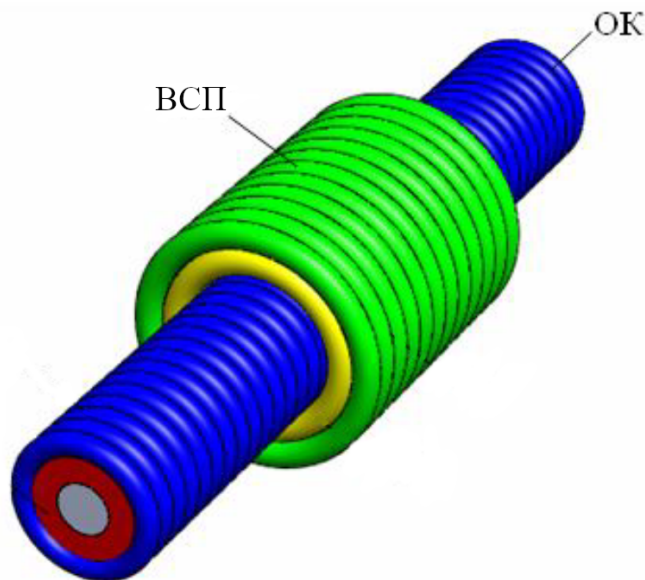


Рис. 1.1. Модель ВСП з циліндричним ОК, поверхня якого являє собою двохшарову котушку.

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.

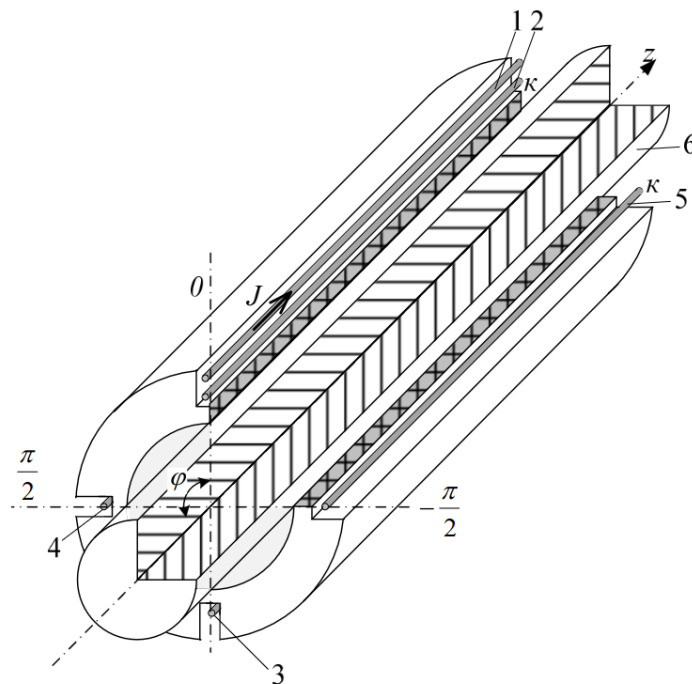


Рис. 1.2. Розташування котушок збудження вздовж металевого циліндра, де 1 — провідник збудження, 2–5 — вимірювальні провідники, 6 — ОК

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.

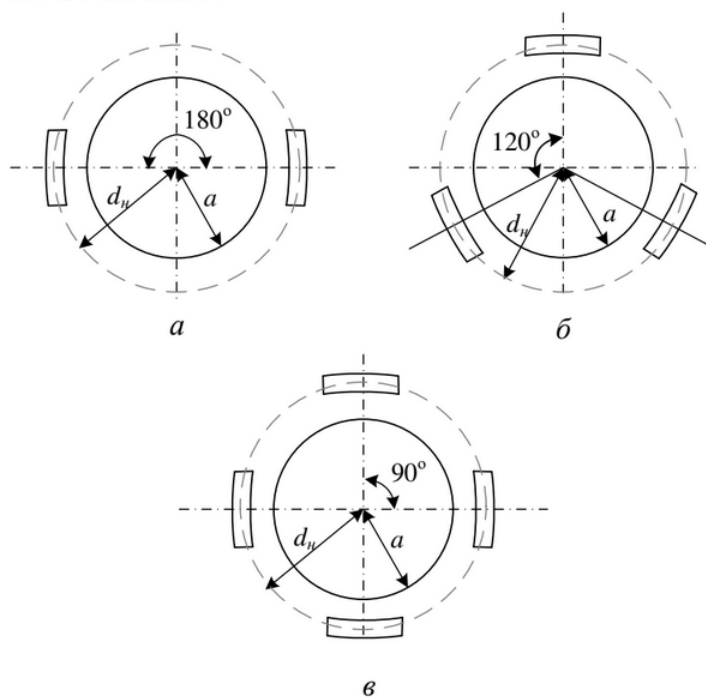


Рис. 1.3. Поперечний переріз намагнічувальних систем зі струмами одного і того ж напрямку та однаковими за величиною.

В публікаціях [6]—[8] вирішення проблеми вихрострумове 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

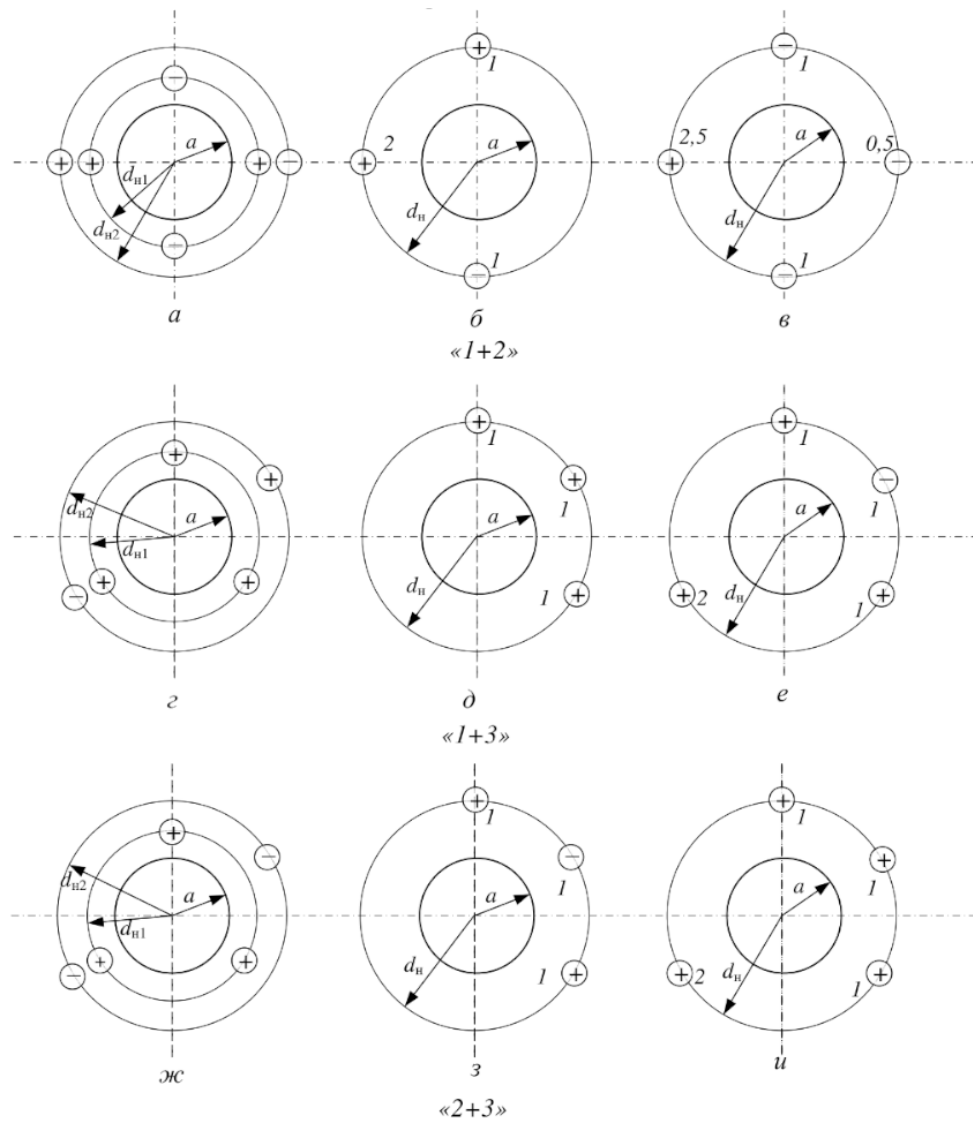


Рис. 1.4. Комбінації намагнічуючих систем перетворювачів з необхідною сумою переважаючих гармонік зондуєчого поля.

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.

Хоч в дослідженні [9] вирішується задача дефектоскопії однак в даній роботі показано один з кращих підходів розв'язку оберненої задачі фізичного процесу. У ході дослідження було використано ANSYS Parametric Design Language (APDL), що застосовує метод скінченних елементів для моделювання процесу розпізнавання дефектів накладною котушкою і виміру імпедансу котушки як характерного значення розпізнавання дефекту. За допомогою APDL автори створили модель, при якій імпеданс вимірювальної котушки в різних позиціях може бути обрахований автоматично. Дослідження показує недоліки і порівнює результат отриманий за допомогою методу скінченних елементів і його апроксимації за допомогою штучних нейромереж (ШНМ).

Обернена задача розпізнавання форми дефектів була вирішена навчанням ШНМ. Використання методу скінченних елементів є досить ресурсозатратним для формування навчальної вибірки для ШНМ та загалом підхід до розв'язку оберненої задачі є досить точним та відносно продуктивним і може бути застосований, з певними модифікаціями, в дослідженнях даної дисертаційної роботи.

В статті [10] показано приклади виміру провідності матеріалу промисловим приладом для вихрострумового контролю. Автори провели калібрування приладу і ряд експериментів на різних частотах і з різною кількістю вимірів на реальних зразках. Багатошаровий контрольний зразок був виготовлений накладання металевих пластин з різною провідністю одну на одну. Наведені якісні результати досліджень та приведені графіки залежності частоти струму збудження при вихрострумовому контролі товщини матеріалу та провідності шарів. Обчислення результату (значення) провідності матеріалу отримані на основі наближених значень каліброваних вимірів різних зраз-

ків реальних ОК. Варто відзначити проведення тестів на реальних зразках та різноманітність матеріалів для формування шарів ОК. Також для розв'язку оберненої задачі такий підхід є важко реалізуємым та дуже затратним як по ресурсам, так і по часу.

Стаття [11] присвячена вимірюванню провідності плоских об'єктів накладним ВСП з застосуванням імпульсного збудження. Наведені результати експериментів вимірювання провідності цим методом листів вуглецевої сталі. Розкрито переваги вимірювання феромагнітних матеріалів імпульсним методом. Також створена аналітична модель для такого виду контролю. Показані результати експериментальних вимірювань, а також вплив зазору між ОК і ВСП на ці результати. В цій роботі описані експерименти тільки з феромагнітними матеріалів та визначення тільки одного параметру — ЕП.

В наступній роботі [12] головною задачею вихрострумового неруйнівного контролю є вимірювання товщини труб, але підходи до вимірювання і проведення комп'ютерного моделювання є перспективними для використання щодо встановлення структури приповерхневого шару матеріалу. Автори створили модель в COMSOL Multiphysics (2D-модель) для реалізації їхнього концепту та в подальших тестах за допомогою побудованої дослідницькою установкою. Проведенням ряду вимірювань та використанням оптимізаційного методу отримано значення товщини матеріалу ОК. Контроль є однопараметровим та так, як використано оптимізаційні засоби, це робить отримання результатів в реальному часі важко реалізуємым. Авторами створено комп'ютерну модель та побудована дослідницька установка для реалізації запропонованого концепту та подальших тестів.

Дослідження [13] описує процес контролю провідності вуглецевого волокна за допомогою вихрострумового датчика спеціальної конструкції: датчик сформований з 2-х контурів і 12-ти сегментів прямокутних котушок в кожному контурі рис. 1.5, розташованих по колу так, що в них формується магнітне поле, що обертається, без необхідності обертати сам датчик рис. 1.6. Це на-

дає зручності та надійності у промисловому використанні. Чутливість таких датчиків досить висока і дозволяє розрізняти вид і товщину вуглеволокна. Обернена задача знайдення провідності за результатами вимірювання імпеданса котушок розв’язувалася за допомогою ШНМ (багатошаровим перцептроном) з набору даних, сформованим від розв’язку прямої задачі, за допомогою мови програмування Python та бібліотек для побудови 3D-моделей методом скінченних елементів FEniCS, Gmsh, та бібліотек візуалізації ParaView.

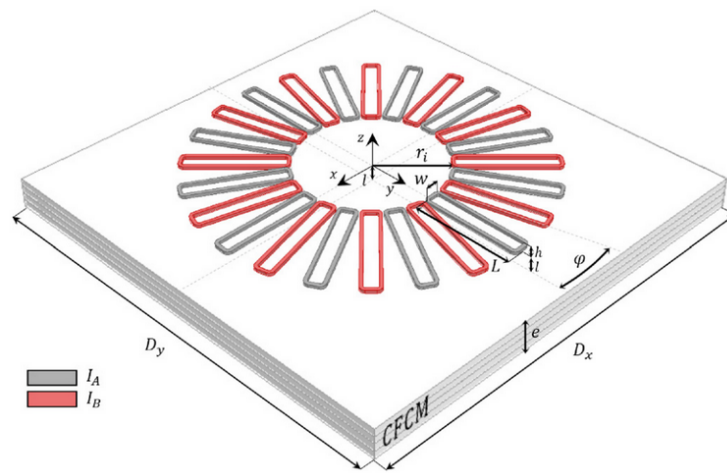


Рис. 1.5. Модель досліджуваної системи.

В дослідженні [14], [15] показаний приклад розв’язку оберненої задачі розрізнення профілів провідності плоских багатошарових об’єктів за сигналом датчика, а саме імпедансу котушки рис. 1.7. Як засіб для розв’язку оберненої задачі також використовувались ШНМ. Для формування вибірки була використана аналітична модель процесу вихрострумowego контролю з накладним циліндричним ВСП. В дослідженнях висвітлюється проблема вибору частоти струму збудження. В цій роботі розв’язок задачі розрізнення параметрів є лише однопараметровим.

В роботі [16] описується варіант розв’язку оберненої задачі визначення ступінчастих змін провідності матеріалу плоских багатошарових об’єктів симплекс-методом. В цьому дослідженні аналітична модель прямої задачі була спрощена для визначення тільки фази як інформативного показника

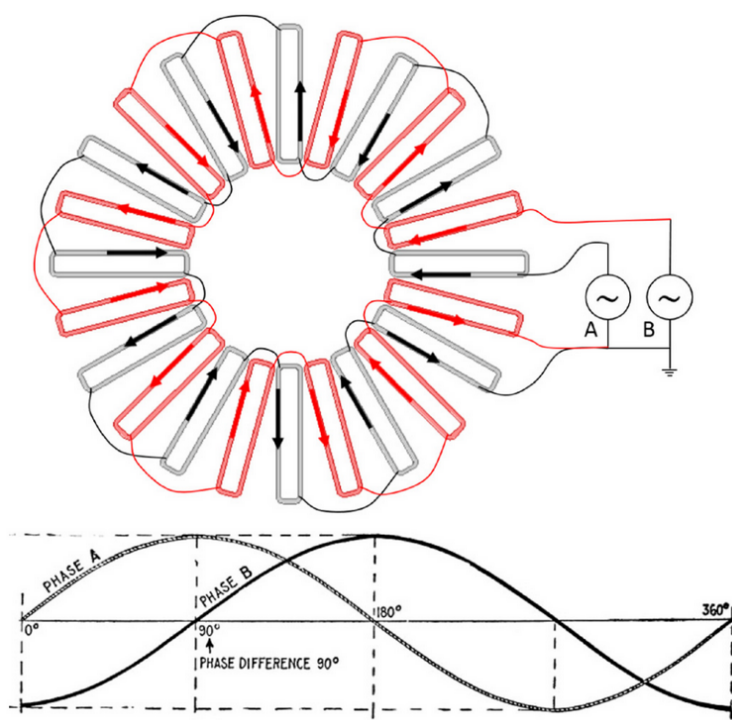


Рис. 1.6. Система збудження ВСП.

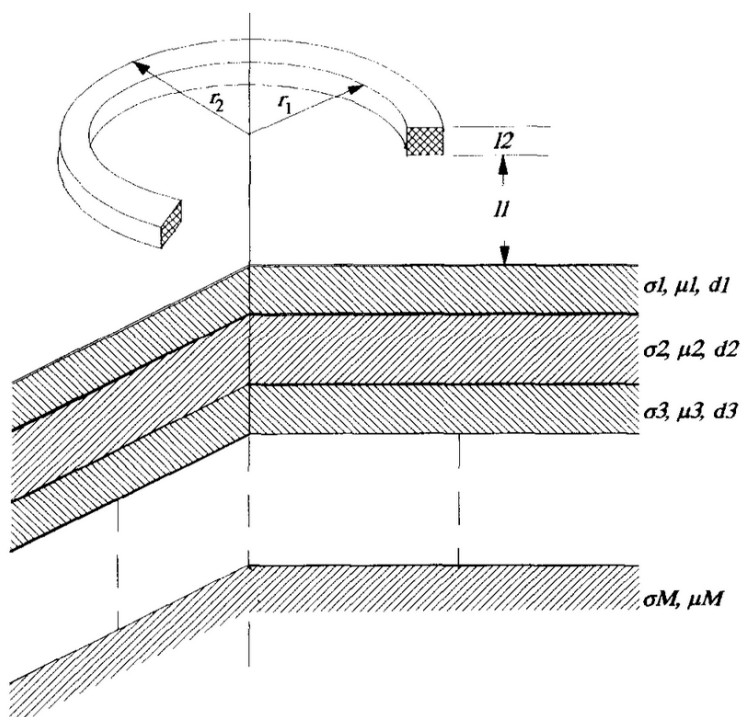


Рис. 1.7. Котушка над плоским багатошаровим об'єктом з М - шарів.

ВСП.

Як можна спостерігати з наведених прикладів дослідники схильні застосовувати різні методи розв'язку прямих та обернених задач. В більш простих випадках можливе застосування спрощених оптимізаційних технік та апроксимацій для отримання адекватних моделей, але зі збільшенням розмірності вхідних даних у некоректно поставлених задачах такі підходи стають мало-ефективними, призводять до збільшення похибки і нелінійного збільшення ресурсозатратності.

Проблема знаходження варіантів компромісу між точністю моделей та їх ресурсоемністю залежить від конкретного випадку, цілей і задач які ставляться перед дослідниками. Як можна помітити, сучасні тенденції схиляються до застосування високоефективних і відносно точних в цьому плані штучних нейронних мереж. На сьогоднішній момент більшість рішень ідентифікації параметрів ОК вихрострумового контролю є або вузькими або не ефективними і складними для реалізації в промисловому виробництві через неможливість їх застосування в реальному часі, необхідності великої кількості вимірювань, додаткових ресурсозатратних технологічних операцій.

## **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, що використовують цільові функції. Цільові функції в таких випадках часто обчислюються за допомогою досить «важких» в сенсі затрат часу чисельних методів, що призводить до практично непереборних перешкод. Заміна ресурсоемної цільової функції її апроксимованим аналогом, тобто сурогатною моделлю (метамоделлю або моделлю-замісником) рис. 1.8, яка відрізняється значно більшою обчислювальною продуктивністю, дає можливість пошуку розв'язку оптимізаційної

задачі за реальний час [17]. В рамках теми дослідження сурогатна модель використовується дещо інакше. В задачах ідентифікації сурогатні моделі можуть виконувати функції накопичувачів апріорної інформації, яка отримана попередньо щодо досліджуваних об'єктів шляхом комп'ютерних чисельних експериментів, проведених за відповідними планами експериментів.

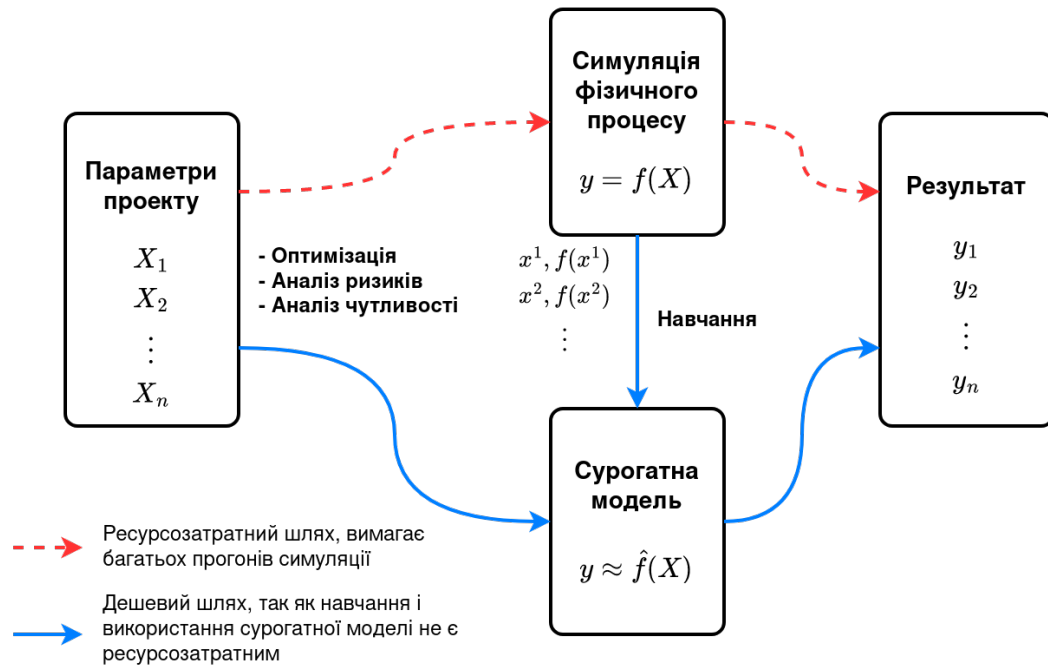


Рис. 1.8. Концепція сурогатного моделювання.

Останніми роками такий підхід зі створенням сурогатних моделей застосовується в різноманітних галузях для вирішення складних проєктних завдань: в машинобудуванні [18], аерокосмічній промисловості [19], турбінобудуванні, будівництві [20]. Таким чином, під метамоделлю або сурогатною моделлю розуміють просту в обчислювальному сенсі формальну модель на складнішу модель, побудовану на фізичних законах, тобто вона є моделлю на модель. Загалом задача побудови сурогатної моделі зводиться до побудови апроксимаційної функції гіперповерхні відгуку, що визначається моделлю на фізичних законах. Це не проста задача, що іноді, в складних випадках, потребує застосування комбінованих методів апроксимації, які поєднують в со-

бі методи штучного інтелекту і традиційні математичні методи наближення та аналізу даних [21].

Наявні різноманітні методи побудови сурогатних моделей, які використовуються науковцями, можна класифікувати варіантом зображеним на рис. 1.9. При цьому можна виділити узагальнені класи сурогатних моделей, а саме геометричних, стохастичних та евристичних, та відповідних методів їх побудови [22]. Слід зазначити, що методи створення сурогатних моделей, які використовуються для технічних задач, відрізняються різноманітними підходами до апроксимації та складністю їх реалізації.

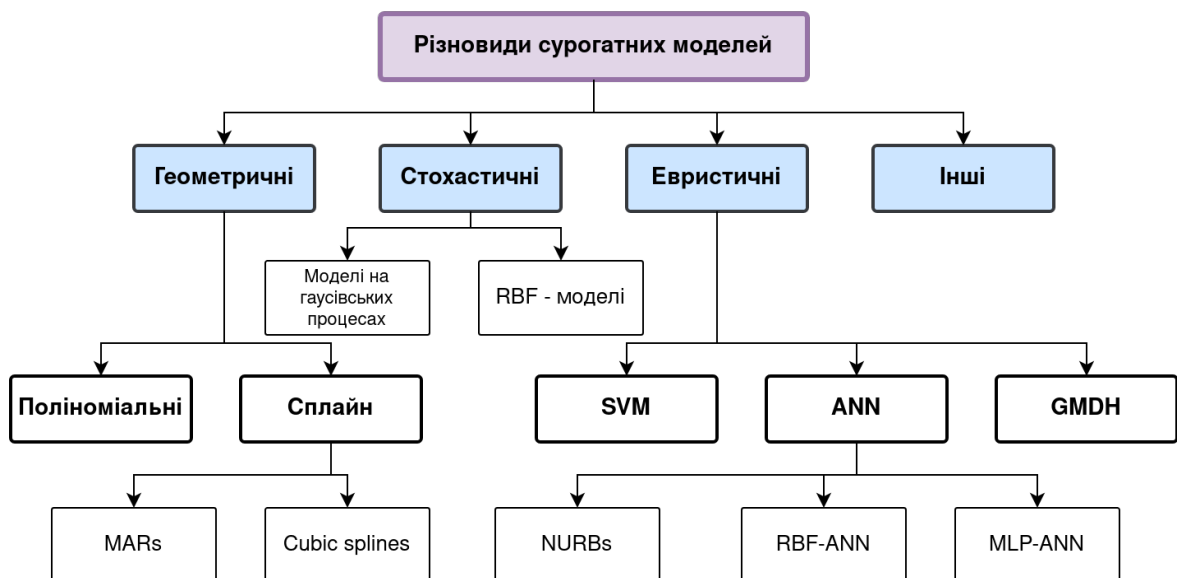


Рис. 1.9. Різновиди методів апроксимації, що застосовуються для побудови сурогатних моделей: MARs — (Multivariate adaptive regression splines) багатоваріантні адаптивні регресійні сплайни; Cubic splines - кубічні сплайни; NURBs — (Non-uniform rational B-splines) неоднорідні раціональні B-сплайни; ANN - (artificial neural networks) штучна нейронна мережа; RBF-ANN — нейронна мережа на радіально-базисних функціях; MLP-ANN — багат шаровий перцептрон; SVM — метод опорних векторів; GMDH — метод групового врахування аргументів.

**1.2.1. Геометричні сурогатні моделі.** Згідно з наведеною класифікацією до першої групи методів побудови сурогатних моделей відносять геометричні, до яких належать всі види поліноміальних моделей та сплайн-моделі.

Поліноміальні моделі, як одні з найпоширеніших, застосовуються науковцями для розв'язання різноманітних задач [23], [18]. Поліноміальна модель отримується, на відміну від лінійної, внесенням додаткових предикторів шляхом піднесення кожного початкового предиктора до певного степеня. Залежність між предикторами і відгуком описується в загальному вигляді регресійною функцією.

$$y = b_0 + b_1 \cdot f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) + \dots + b_{m-1} \cdot f_{m-1}(x_1, x_2, \dots, x_m) + \varepsilon, \quad (1.1)$$

де  $f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $i = 1, \dots, m-1$  — задані функції факторів  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,  $b_0, b_1, \dots, b_{m-1}$  — коефіцієнти математичної моделі,  $\varepsilon$  — залишок або випадкова складова.

В залежності від вибраної функції  $f_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$  регресійна модель може бути представлена по-різному. Наприклад, для однофакторної поліноміальної регресії функція має вигляд (1.1), а поліноміальна модель 2-го порядку для трьох факторів містить головні ефекти (тобто ефекти першого порядку) та квадратичні ефекти (тобто ефекти другого порядку) і має вигляд:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_1^2 + b_3 \cdot x_2 + b_4 \cdot x_2^2 + b_5 \cdot x_3 + b_6 \cdot x_3^2 + \varepsilon.$$

Коефіцієнти математичної моделі оцінюються методом найменших квадратів. Зазвичай степінь поліному більше ніж 3 або 4 не використовується, оскільки в такому випадку поліноміальна крива стає надмірно гнучкою і приймає неадекватний вигляд. Класичний регресійний аналіз передбачає виконання низки передумов [24], які насправді можуть не виконуватися, а їх перевірка достатньо складна, оскільки передбачає проведення складних екс-



периментів і вимагає значних ресурсів на її здійснення. В поліноміальних моделях в залежності від складності гіперповерхні відгуку завжди виникає проблема вибору порядку моделі, яка на практиці вирішується ітеративним методом в бік поступового підвищення з метою уникнення перенасичення. Одним з методів розв'язання регресійних задач є застосування багатовимірних адаптивних сплайнів MARs, що дозволяє встановлювати вигляд і параметри апроксимаційної функції, з заданою точністю відтворюючої початкові дані [25]. Простір пошуку значень вхідних змінних розбивається на області, в яких використовуються різні базисні функції певних видів та їх добутки з декількох співмножників. В основі роботи методу покладено вибір необхідної зваженої суми базисних функцій з їх загального набору (словника). Алгоритм MARs-сплайнів шукає в просторі всіх вхідних змінних місця розташування вузлових точок, а також взаємозв'язки між змінними. Коефіцієнти розкладання і сам робочий набір базисних функцій вибираються за допомогою ітеративної евристичної процедури включення-виключення, що дає дещо меншу точність апроксимації, ніж за використання повного словника. Метод MARs-сплайнів знаходить шукану залежність у два етапи. Перший етап полягає в додаванні базисних функцій до робочого набору, доки не буде мінімізовано загальний критерій якості моделі [25] або ж буде досягнута максимальна кількість базисних функцій. На другому етапі з робочого набору видаляються функції, які не впливають суттєво на критерій точності моделі, що відображає зростання дисперсії з ростом числа базисних функцій. Для розрахунку невідомих коефіцієнтів розкладання використовують метод найменших квадратів. Маючи деякі переваги перед класичними статистичними методами побудови апроксимаційної моделі, MARs все ж є чутливим до початкових вхідних даних. Крім того, метод має значні часові затрати на розрахунок коефіцієнтів моделі методом найменших квадратів у випадку розв'язання задач великої розмірності.

**1.2.2. Стохастичні сурогатні моделі.** Представником стохастичних методів побудови сурогатних моделей є регресія на основі гаусівських процесів (або kriging) [26], що дозволяє створювати нелінійні апроксимаційні моделі. Методи побудови сурогатних моделей на основі гаусівських процесів та їх застосування в задачах оптимізації розглядаються в роботах [27] і [28]. Відомо, що будь-який випадковий процес визначається середнім значенням та коваріаційною функцією. У разі використання реальних даних коваріаційна функція гаусівського процесу невідома. Тому вводиться припущення, що коваріаційна функція належить до деякого параметричного сімейства. В залежності від апріорних уявлень про вигляд апроксимаційної залежності вибирається сімейство коваріаційних функцій. Так в роботі [29] передбачалося, що коваріаційна функція належить до експоненціального сімейства, а в [30] — до сімейства на основі відстані Махаланобіса. Коваріаційна функція другого сімейства дозволяє створити модель більш загальну, проте обмежує роботу з даними великої розмірності, оскільки значно збільшується кількість параметрів коваріаційної функції, які необхідно оцінити. У зв'язку з цим в роботі [30] вирішується актуальне завдання розробки алгоритму налагодження параметрів коваріаційної функції на основі відстані Махаланобіса, який дозволяє виконувати ці дії і для випадку даних великої розмірності. У порівнянні методів у двовимірному випадку стандартний і запропонований авторами [30] алгоритми налагодження параметрів коваріаційної функції мають однакову точність. Зі збільшенням розмірності стандартний метод з використанням відстані Махаланобіса має суттєво меншу точність у порівнянні із запропонованим алгоритмом повороту координатних осей [30], оскільки збільшується кількість гіперпараметрів, які необхідно визначати в процесі навчання. З метою зменшення обчислювальних затрат та підвищення точності оцінювання параметрів моделі, в роботі [29] пропонується метод моделювання нестационарної коваріаційної функції на основі лінійного розкладання по словнику параметричних функцій та використання байє-

сівської регуляризації. Для байєсівської регуляризації використовуються нормальний та гамма-розподіл параметрів. Обидва розподіли дозволяють уникати виродження апроксимації, збільшувати узагальнювальну здатність і надійність алгоритмів. Використовуючи метод, слід враховувати, що для побудови моделі на основі гаусівських процесів необхідно оцінити вектор параметрів коваріаційної функції. Регресія на основі гаусівських процесів передбачає наявність заздалегідь заданої коваріаційної функції, яка необхідна для оцінювання параметрів цих процесів, що, відповідно, впливає на обчислювальну складність методу. Розрахунок параметрів моделі виконується методом максимальної правдоподібності, який передбачає виконання досить громіздких матричних перетворень, що суттєво впливає на затрати часу зі збільшенням розмірності задачі (1.2). У разі, коли є великий масив вихідних даних, найчастіше використовуються регресійні RBF-моделі, які так само створюються застосуванням стохастичних методів побудови [31], [32]. Радіальна базисна функція апроксимації використовує лінійні комбінації  $K$  радіально-симетричних функцій  $\phi$ .

$$f(x) = \sum_{j=1}^K \lambda_j \cdot \phi \left( \|x - c^{(j)}\| \right), \quad (1.2)$$

де  $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k]^T$  — вектор параметрів моделі,  $x$  — вектор проєктних змінних,  $\phi$  — базисна функція,  $c^j, j = 1 \dots k$  — відомі центри базисних функцій.

Параметри моделі  $\lambda$  визначаються аналогічно, як і у випадку поліноміальної регресії. Тобто функція апроксимації  $f(x)$  є лінійною комбінацією деяких базисних функцій з відповідними ваговими коефіцієнтами. Найроповсюдженіші базисні функції — лінійна, кубічна, полігармонічний сплайн, TP-сплайни (Thin Plate splines або сплайн-поверхні) [31], [32]. Проте більшу гнучкість мають параметричні базисні функції, наприклад, гаусівська, зворотна квадратична, мультиквадратична, зворотна мультиквадратична

та інші [31]. Розрахунок вектору параметрів моделі виконується методом найменших квадратів, що в задачах великої розмірності вимагає суттєвих обчислювальних ресурсів.

**1.2.3. Евристичні моделі.** Розглядаючи клас евристичних сурогатних моделей, можна виділити моделі з використанням методу групового урахування аргументів GMDH, методу опорних векторів (SVM) та штучних нейронних мереж (ANN).

Створення GMDH-сурогатних моделей ґрунтовано на сортуванні поступово ускладнених варіантів моделей з вибором їх оптимальної структури [33], [34]. Цей метод має переваги, коли відсутня або майже відсутня апріорна інформація про структуру моделі і розподіл її параметрів. Ідея методу полягає у формуванні за даними вибірки деякої множини моделей  $\hat{y}_f$  різноманітної структури, що мають такий вигляд:

$$\hat{y}_f = f \left( \|X, \hat{\theta}_f\| \right),$$

де  $X$  — матриця значень змінних, що утворює вибірку спостережень,  $\hat{\theta}_f$  — оцінка параметрів моделі.

Далі з отриманої множини моделей  $\hat{\theta}_f$  визначається оптимальна модель  $f^*$  за критерієм мінімуму оцінки якості моделі  $C$ :

$$f^* = \arg \min C \left( \|y, \hat{y}_f\| \right),$$

де  $y$  — вектор вихідних значень у вибірці даних.

Оцінка параметрів для кожної моделі є також розв'язанням ще однієї екстремальної задачі. Зв'язок між вхідними і вихідними змінними описується у вигляді функціонального ряду Вольтерра, дискретним аналогом якого є уза-

гальнений поліном Колмогорова-Габора:

$$\hat{y}_f = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ijk} \cdot x_i \cdot x_j \cdot x_k,$$

де  $a_0, a_i, a_{ij}, a_{ijk}$  — коефіцієнти поліному,  $x_i, x_j, x_k$  — вхідні змінні,  $n$  — кількість вхідних змінних.

Існує чотири базових алгоритми GMDH та велика кількість їх модифікацій: COMBI — комбінаторний алгоритм, MULTI — комбінаторно-селекційний алгоритм, MIA — багаторядний ітеративний алгоритм, RIA — релаксаційний ітеративний алгоритм. Всі базові алгоритми є багаторядними. В кожному ряді може знаходитися декілька моделей, які характеризуються однаковим рівнем складності. Алгоритми відрізняються між собою умовами формування і відбору змінних при переході від одного ряду до іншого. Ідея COMBI полягає в використанні всіх можливих моделей без їх пропуску, саме тому на кожному рівні складності розглядаються всі моделі і не проводиться селекція кращих комбінацій змінних. Проте його практичне застосування обмежено задачами з невеликою кількістю ознак  $n$ , оскільки кількість можливих комбінацій експоненціально збільшується зі збільшенням кількості змінних моделей. Тому в цьому алгоритмі кількість змінних обмежена,  $n = 20$ . Ідея алгоритму MULTI — зменшити кількість моделей, що розглядаються в кожному ряді, без втрати кращої комбінації змінних. На кожному рівні складності відбирається фіксована кількість кращих поєднань змінних моделі, а потім кращі поєднання комбінуються з усіма іншими змінними по черзі при переході на наступний рівень. Алгоритм MIA реалізує ідею зменшення кількості моделей, які розглядаються в кожному ряді, зі зменшенням кількості рядів, що дозволяє прискорити забезпечення оптимального рівня складності. На кожному ряді відбирається фіксована кількість кращих моделей, а потім кожна пара цих кращих моделей породжує нову змінну

при переході на наступний рівень. Кількість кращих моделей та функцію перетворення необхідно задавати апріорі. Попри високу продуктивність цей алгоритм здатен пропускати оптимальні рішення та зі збільшенням кількості рядів характеризується різким ускладненням моделі, тоді як значення зовнішнього критерію якості при цьому зменшується несуттєво. Серед основних переваг алгоритму GMDH [35], [36] можна виділити те, що за його допомогою для коротких, неточних або зашумлених даних може бути знайдена оптимальна не фізична модель. При цьому точність і структура такої моделі є прийнятними для подальшого застосування. Принциповим недоліком таких параметричних алгоритмів GMDH є необхідність оцінювання параметрів підсумкової моделі, які можуть бути зміщеними; додаткові витрати часу на пошук ефективного виду моделі. Також для задач нелінійної регресії використовується потужна і універсальна модель машинного навчання — так званий метод опорних векторів SVM (support vector machine) [37]. Цей метод передбачає створення набору гіперплощин в багатовимірному або нескінченному просторі, які використовуються для розв'язання задач регресії. Алгоритм SVM спочатку розроблявся для лінійної і нелінійної класифікації. Частіше за все використовується модель із застосуванням класу SVR з бібліотеки Scikit-Learn, яка підтримує ядровий трюк (kernel trick) і дозволяє керувати балансом між шириною смуги поміж класами та обмеженням кількості порушень зазору, використовуючи гіперпараметр  $C$ . Ядровий трюк передбачає додавання додаткових поліноміальних ознак до набору даних, що робить можливим реалізацію нелінійної класифікації в результаті переходу до нового простору ознак. На практиці використовуються поліноміальні і гаусівські ядра. Безпосередньо для задач регресії використовується параметрично редукована (kernelized) модель SVM. Під час розв'язку задач регресії SVM-методом застосовується ефективний математичний прийом. Його ідея полягає в інвертуванні мети: замість спроби пристосуватися до найширшої з можливих смуг між класами, одночасно обмежуючи порушення зазору,

регресія SVM намагається помістити якомога більше зразків даних на смугі разом з обмеженням порушення зазору (тобто зразків поза смугою). Ширина смуги керується гіперпараметром  $\varepsilon$ . Розповсюджений підхід з пошуку доцільних значень гіперпараметрів полягає у використанні пошуку на ґратці. Метод SVM найкраще підходить для невеликого і середнього наборів даних. На великих навчальних вибірках цей метод апроксимації характеризується великими обчислювальними затратами.

Також потужним апаратом для апроксимації складних залежностей є штучні нейронні мережі (НМ) [38], а саме НМ на радіально-базисних функціях RBF-ANN та багатошарових персептронах MLP-ANN рис. 1.10. Універсальні апроксимаційні властивості НМ та відсутність вимог попереднього «точного, жорсткого» задання вигляду моделі є причиною їх широкого застосування при створенні сурогатних моделей у складних випадках топології гіперповерхні відгуку [39].

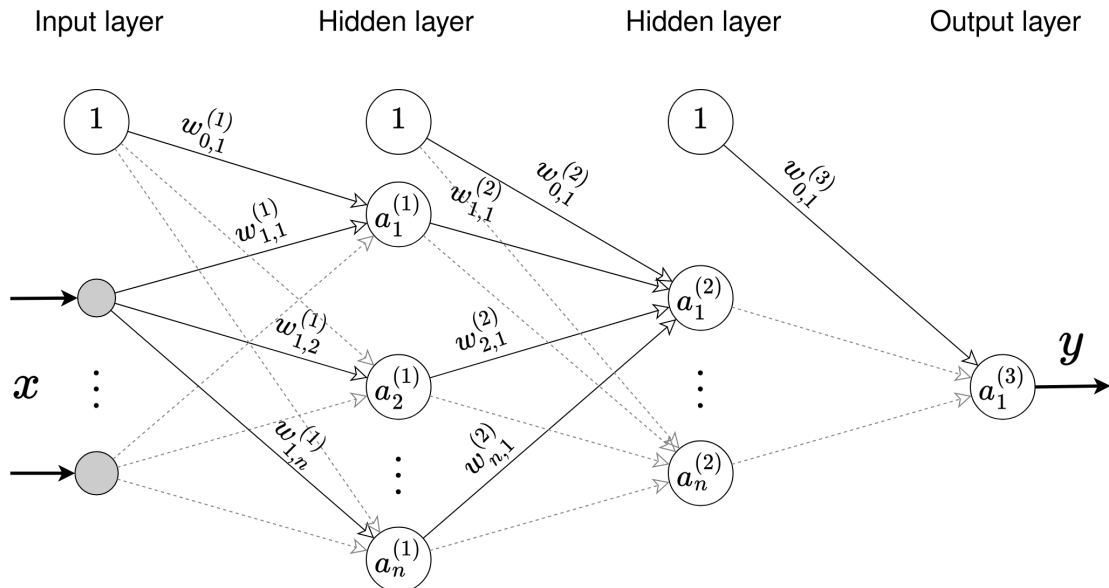


Рис. 1.10. Структура регресійної двошарової дійснозначної штучної MLP-ANN

Відсутність «жорстко» заданого апріорного зв'язку шуканого розв'язку з конкретною моделлю надає переваги НМ, оскільки вона виявляється більш

пристосованою до роботи в умовах невизначеності. Основні переваги НМ головним чином зумовлені: навчанням на прикладах; підвищенням завадостійкості до зашумлених та суперечливих даних; стійкістю до помірних змін побічних параметрів об'єкта, які не є шуканими в процесі розв'язку. Разом з тим їм притаманні і деякі недоліки, один з яких це відносно великий час для навчання мережі та відсутність аналітичного запису отриманої апроксимаційної функції. В класифікації нейронних мереж виділяють два фундаментальні класи: мережі прямого розповсюдження (одношарові та багатошарові) та рекурентні мережі або мережі зі зворотним зв'язком [40], але практичне застосування в апроксимаційних задачах знайшли перші з них. Завдяки великій кількості алгоритмів і методик навчання та багатьох видів функцій активації досягається створення великого розмаїття НМ. Теоретичною основою і обґрунтуванням того, що НМ здатна апроксимувати будь-яку функціональну залежність є теорема Колмогорова-Арнольда про універсальну апроксимацію [38]. Будь-яка неперервна функція  $K$  аргументів в одиничному кубі  $[0, 1]^K$  може бути представлена у вигляді суперпозицій неперервних функцій одного аргументу і операції додавання (1.3).

$$F(x_1, x_2, \dots, x_k) = + \sum_{i=1}^N a_i \cdot f \left( \sum_{k=1}^K a_{ik} \cdot x_k + a_{0k} \right), \quad (1.3)$$

де  $(x_1, x_2, \dots, x_k)^T$  — вектор вхідних даних,  $f()$  — обмежена непостійно монотонно висхідна неперервна функція,  $K$  — кількість вхідних вузлів,  $N$  — кількість нейронів прихованого шару,  $a_{ik}$  — синаптичні ваги прихованого шару,  $a_i$  — синаптичні ваги вихідного шару,  $a_{0k}$  — зміщення.

В основі побудови RBF-мереж покладено розбиття простору пошуку гіперсферами, які задаються своїм центром та радіусом. RBF-мережа має у своєму складі: вхідний шар, що з'єднує мережу з середовищем спостереження; прихований шар (або проміжний), що складається з елементів з ядерними базисними функціями активації; лінійний вихідний шар — звичайний одно-



шаровий персептрон, який в результаті налаштування ваг визначає вихід мережі [38], [40]. В якості функції активації нейронів прихованого шару часто використовують функцію Гауса, але можливі й інші різновиди функцій, наприклад, квадратична ядерна функція, ядро Єпанечникова, зворотна мульти-квадратична функція, сплайн-функція, функція Коши. Із застосуванням гаусівської функції активації вихід мережі формується як лінійна комбінація виходів нейронів прихованого шару і описується виразом (1.4).

$$u(\vec{x}) = \sum_{k=1}^m w_k \cdot \phi_k(\vec{x}) = + \sum_{k=1}^m w_k \cdot \exp\left(-\frac{r_k^2}{a_k^2}\right), \quad (1.4)$$

де  $\vec{x}$  — вхідний вектор,  $(x_1, x_2, \dots, x_l)^T$ ,  $r_k = \|\vec{x} - \vec{c}_k\| = \sqrt{(x_1 - c_{x_1k})^2 + (x_2 - c_{x_2k})^2 + \dots + (x_l - c_{x_lk})^2}$  — радіус  $k$ -го нейрона,  $l$  — кількість змінних цільової функції,  $m$  — кількість нейронів прихованого шару,  $w_k$  — вага зв'язку вихідного нейрона з  $k$ -м нейроном прихованого шару,  $\vec{c}_k$  — вектор координат центру  $k$ -го нейрона, який містить координати  $(c_{x_1k}, c_{x_2k}, \dots, c_{x_lk})^T$ ,  $a_k$  — ширина  $k$ -го нейрона,  $\phi_k(\vec{x})$  — гаусівська функція активації прихованого шару.

Задача апроксимації RBF-мережею зводиться до оптимального вибору ваг вихідного шару, кількості радіальних функцій (нейронів), а також їх параметрів: центрів розташування цих функцій та їх ширини, які є нелінійними параметрами прихованого шару. До переваг нейронних RBF-мереж відносять те, що вони мають лише один прихований шар нейронів, який істотно спрощує характерну для складніших НМ задачу вибору кількості прихованих шарів і робить цей вибір визначеним. Також ці мережі швидко навчаються, що зумовлено можливістю застосування добре вивчених методів лінійної оптимізації при підборі параметрів лінійної комбінації у вихідному шарі мережі. Але розмірність RBF-мереж експоненційно зростає зі збільшенням розмірності вихідних даних, а при їх навчанні є необхідність використання великої кількості прикладів. Крім того, RBF-мережа не здатна

до екстраполяції даних при збільшенні ширини діапазону вхідних даних [39].

Багатошаровий персептрон прямого розповсюдження складається з множини сенсорних елементів (вхідних вузлів та вузлів джерела), які утворюють вхідний шар; одного або декількох прихованих шарів обчислювальних нейронів та одного вихідного шару. Вхідний сигнал розповсюджується мережею в прямому напрямку, від шару до шару. Навчання з «учителем» такої мережі виконується за допомогою алгоритму зворотного розповсюдження помилки, який ґрунтується на корекції похибок. В загальному випадку це відповідає популярному алгоритму адаптивної фільтрації — алгоритму мінімізації середньоквадратичної похибки. Існують також і інші алгоритми навчання MLP-мереж, які використовують різноманітні стратегії найшвидшого просування до точки мінімуму [38], [40], наприклад, спуск по спряженим градієнтам і метод Левенберга-Марквардта.

Багатошарові персептрони мають декілька відмінних ознак:

- кожен нейрон мережі має переважно гладку функцію активації, наприклад, гіперболічного тангенса. Найбільш розповсюджена форма такої функції є сигмоїдальна та ReLU, яка визначається логістичною функцією. Теоретично доведено, що з використанням таких найпростіших перетворень можна наближувати достатньо складні багатовимірні функції, і, як наслідок, оцінювати складні залежності;
- мережа містить один або декілька шарів прихованих нейронів, які не належать до входу або виходу мережі. Ці нейрони дозволяють мережі навчатися розв'язувати складні задачі, послідовно враховуючи важливі ознаки з вхідного вектора;
- мережа має високий ступінь зв'язаності, що реалізується за допомогою синаптичних з'єднань. Зміна рівня зв'язаності мережі вимагає зміни множини синаптичних з'єднань або їх вагових коефіцієнтів.

Поєднання позитивних різноманітних властивостей MLP-мереж разом,

з урахуванням їх здатності до навчання, забезпечує суттєву обчислювальну потужність регресійного багатошарового персептрона. Застосування MLP-мережі передбачає крім вибору алгоритму навчання, необхідність застосування різноманітних методів оптимізації структури мережі для кожної конкретної задачі.

Для гіперповерхонь відгуку складної топології має сенс вживання технології декомпозиції областей пошуку та технік асоціативних машин. А рішення з вибору остаточної архітектури НМ може бути прийнято тільки після повного циклу навчання різноманітних варіантів їх структур та оцінки адекватності й інформативності отриманих сурогатних моделей за сукупністю статистичних показників.

Так як евристичні сурогатні моделі на основі ШНМ не потребують використання значних обчислювальних ресурсів та успішно виконують функції моделі-замісника — це є одним з найкращих варіантів вибору при розв'язку обернених задач.

Особливої уваги заслуговують глибокі ШНМ (DNN, DANN), вони забезпечують високу швидкодію та точність при необхідності апроксимації складних нелінійних функцій з великою кількістю входів. Створені таким чином апроксимаційні моделі, що є носіями апріорної інформації, можуть використовуватися безпосередньо у вимірювальних операціях, що дозволяє забезпечити розв'язання обернених задач в реальному масштабі часу.

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

Як правило, для побудови адекватних та точних апроксимаційних моделей потрібні плани експерименту. Наприклад, для випадку, як у дисертаційному дослідженні, коли гіперповерхня відгуку заздалегідь не відома, щоб забезпечити точність, потрібен однорідний комп'ютерний план експерименту.

Сурогатні моделі у вигляді штучних нейронних мереж відносяться до data driven методів, а це означає, що якість вибірки напряму впливає на якість відтворення результатів моделювання в подальшому.

Створення однорідного плану експерименту можливе за допомогою, наприклад, сукупності визначених в просторі точок, отриманих з використанням випадкових та квазі-випадкових послідовностей [41], [42], наприклад послідовності: Kronecker, Richtmyer, Ramshaw, Weyl, Van der Corput, Halton, Faure, Sobol, Niederreiter, R - послідовностей Робертса. Серед широко відомих квазі-випадкових послідовностей можна виділити послідовності Halton та Sobol.

На рис. 1.11 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.

Основними критеріями досконалості планів експерименту є оцінки гомогенності за показниками узагальнених розбіжностей, які кількісно характеризують відхилення згенерованого розподілу від ідеального рівномірного [43]. Окрім того випадкові чи квазі-випадкові послідовності можуть бути оцінені за центрованою та циклічною розбіжністю, мінімальною дистанцією упаковки, візуально за діаграмами Вороного чи Тріангуляцією Делоне, та оцінкою дискретного розміщення (Discretized Packing).

Хоча двовимірні Sobol послідовності і відносяться до послідовностей з малим розходженням, проте існують і такі їх комбінації, що не демонструють хороших показників однорідності. Наприклад, комбінації які представ-

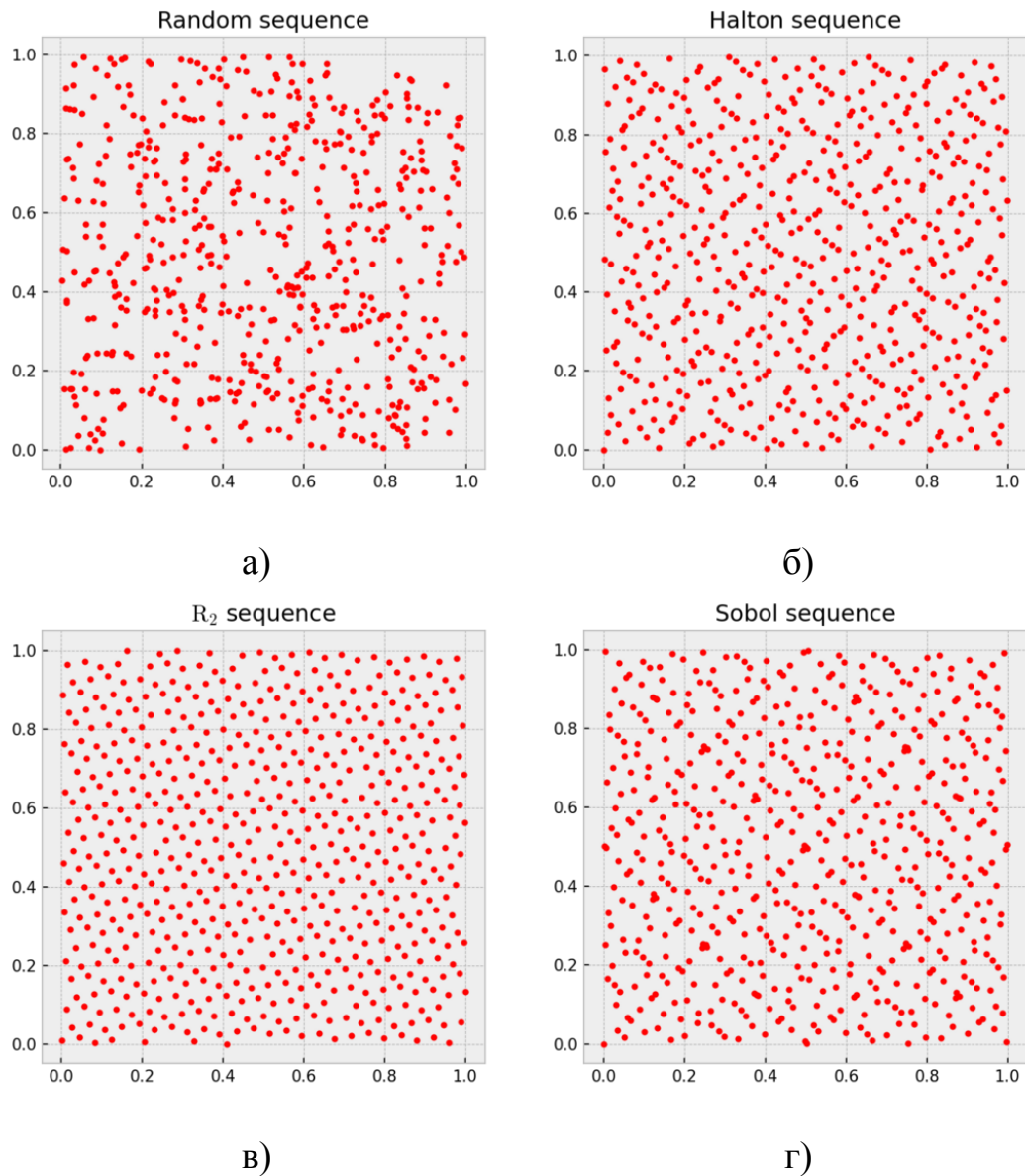


Рис. 1.11. Порівняння двовимірних квазі-випадкових та простої випадкової послідовності: а) прості випадкові послідовності; б) послідовності Халтона; в)  $R$  послідовності; г) послідовності Соболя.

лено на рис. 1.12. Тому вибір «кращих» і «гірших» пар Sobol послідовностей потребує додаткових досліджень. Із результатів отриманих в дослідженнях [44] показники розбіжності відносно  $L_2$ -норми для двовимірних планів та візуального аналізу діаграм Вороного можна переконатися, що існують такі комбінації Sobol послідовностей, які мають різні показники узагальненої розбіжності, деякі з них є кращими, а деякі є значно гіршими, у порівнянні з

R послідовностями.

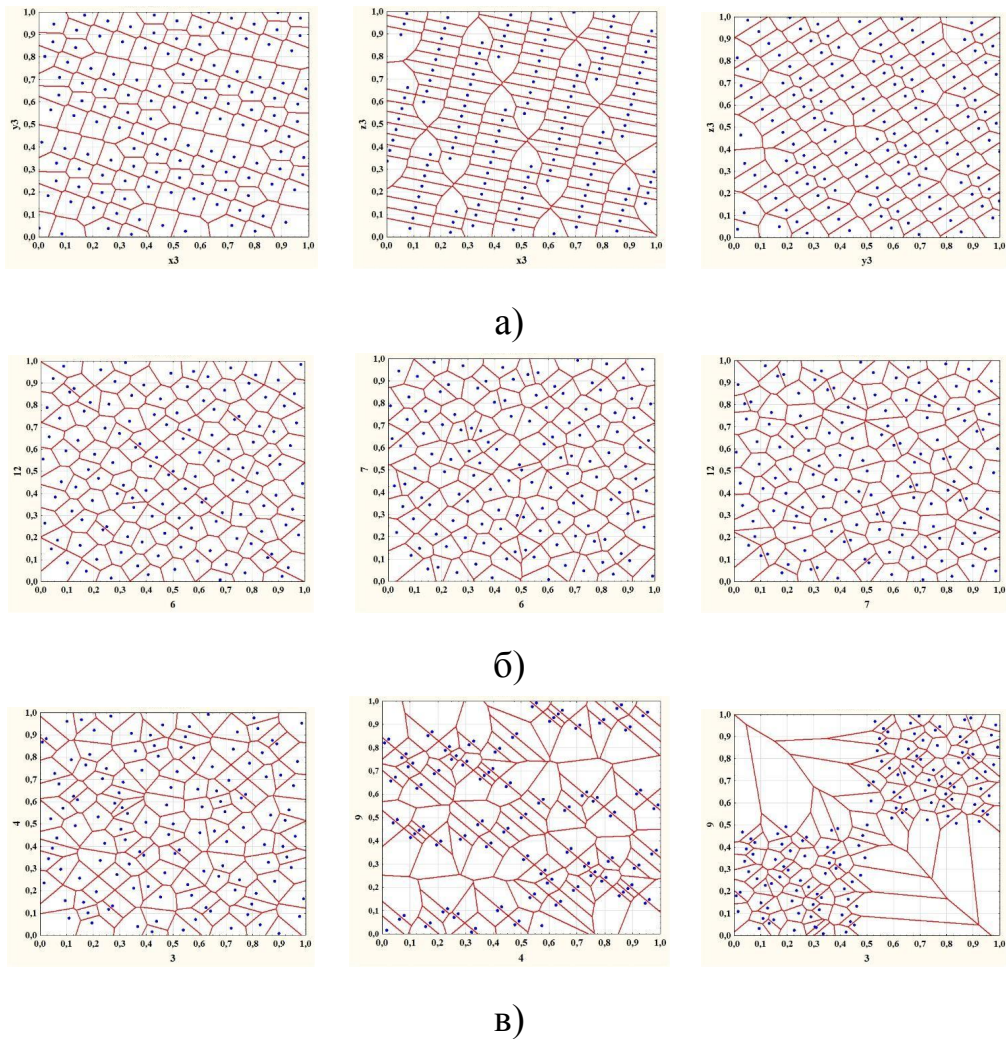


Рис. 1.12. Діаграми Вороного для проєкцій тривимірних планів: а)  $R_3$  послідовність; б), в) комбінації Sobol послідовностей  $(\xi_6, \xi_7, \xi_{12})$ ,  $(\xi_3, \xi_4, \xi_9)$  відповідно, де  $\xi_i$  – послідовність конкретного напрямку простору значень.

Для багатовимірних планів, зі збільшенням розмірності простору все складніше відшукувати комбінації Sobol послідовностей, які мають найкращі показники узагальненої розбіжності, що потребує значних часових затрат. Хоча використання комбінацій Sobol послідовностей все ж іноді показує кращі результати в результаті вдалого вибору направляючих чисел, однак проводячи серію досліджень автоматизація формування вибірок є досить затратною і не завжди раціональною. Тому перехід до R послідовностей в цьому випадку має суттєву перевагу в гомогенності і простоті використа-

ння, так як вони гарантовано забезпечують рівномірне розподілення при збільшенні розмірності даних.

#### **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. Вони мають здатність до узагальнення (generalization), а це означає, що вони можуть опрацьовувати результат на основі вхідних даних, які не були присутні в навчанні [38]. Крім того, нейромережам притаманні наступні якості: нелінійність, відображення вхідної інформації у вихідну; адаптивність, очевидність відповіді, масштабуємість, уніфікація аналізу і проєктування.

Нещодавно, data driven підходи з DNN розкрилися як нові потужні і гнучкі підходи до створення моделей для розв'язання прямих задач [45]—[52]. Подальшим розвитком використання DNN є припущення, що DNN також можуть розв'язувати обернені задачі в тому числі реалізувати інверсію прямих задач [45].

Та незважаючи на цей факт, отримати розв'язок оберненої задачі на практиці важко реалізуємо. Тому для створення моделі оберненої задачі доводиться багаторазово та ітеративно отримувати розв'язок прямої задачі. Такі прямі розв'язки зазвичай виведені з рівнянь Максвелла для кожної зони розташування точки розрахунку. Вони є досить обмеженими і відносно ресурсозатратними. Незважаючи на переваги аналітичних чи напіваналітичних методів розв'язку прямої задачі, іноді вони не працюють в певних задачах. Стає досить складно знайти напіваналітичне рішення, яке може точно виявити чи відтворити нюанси фізичного явища конкретної задачі. Проблема загострюється коли задача переходить від одно чи двовимірних задач до трьох

і більше. В таких випадках використовується метод скінченних елементів (Finite Element Method, FEM) щоб отримати адекватні моделі. Альтернативою чи апроксиматором ресурсозатратного FEM чи аналітичних рішень є модель основана на DNN.

Особливістю DNN є те, що нейромережі здатні вчитися і відтворювати результат при досить специфічних задачах, коли існує багато змінних чи поверхня відгуку має складну нелінійну залежність [46]. Іноді DNN корисні бо можуть знайти чи відкрити певні нелінійні зв'язки між відгуками в латентному просторі [49]. Але на відміну від прямих задач, де спостерігається відношення “один до одного” між фізичною системою і її відповідним відгуком, інверсія прямих рішень часто зітворюється з можливими проблемами неоднозначності. Тобто декілька вихідних сигналів можуть відповідати одному набору вхідних даних, що робить проблему ще тяжчою для рішення [53]. Існує декілька методів обійти чи вирішити цю проблему, про такі методи з використанням нейромереж викладено нижче.

Навчання з учителем може бути визначене як задача віднайдення комплексних, зазвичай нелінійних, залежностей між двома наборами визначених даних [54]. Так як це випадок, коли мережа навчається відтворювати значення явно відомих зразків пар входів виходів. Навчання з учителем підходить для розв'язку коректно поставлених задач [45], [53], [55]—[58]. Варто зазначити, що коли оптимізаційні підходи в цій задачі застрягали в локальних мінімумах, то запропонований підхід з DNN привів до найбільш оптимального результату.

На відміну від навчання з учителем, навчання без учителя може знаходити важливі патерни, кластери за певними ознаками чи особливостями, опрацьовуючи дані без явно визначених маркувань [59], [60]. Це дозволяє застосовувати DNN до менш чітко видимих, а значить і складніших проблем. Виходячи з того, що нейромережі з навчанням без учителя навчаються самі по собі без спеціальної цілі, вони мають іншу природу ніж навчання з учителем, що до-



зволяє відшукати абсолютно нові чи латентні патерни, кластери, зв'язки чи закономірності в наборах даних [61], [62]—[65].

Навчання з підкріпленням (Reinforcement learning, RL), це вид машинного навчання, що часто використовується в задачах теорії ігор і робототехніці [66]. Алгоритм RL проілюстрований на рис. 1.13, де так званий “агент” вибирає з набору дій ( $dg$ ) куди рухатися та який стан ( $g$ ) вибрати з ціллю отримати винагороду. Агент робить спроби знайти баланс між кількістю чи набором дій та пошуком шуканої винагороди, наприклад використовуючи жадібний (epsilon-greedy) алгоритм [67]. Середовище зазвичай представляється прямою DNN чи CEM моделлю, що обраховує винагороду з пари стан — дія (тобто вираховуючи  $s$ ).

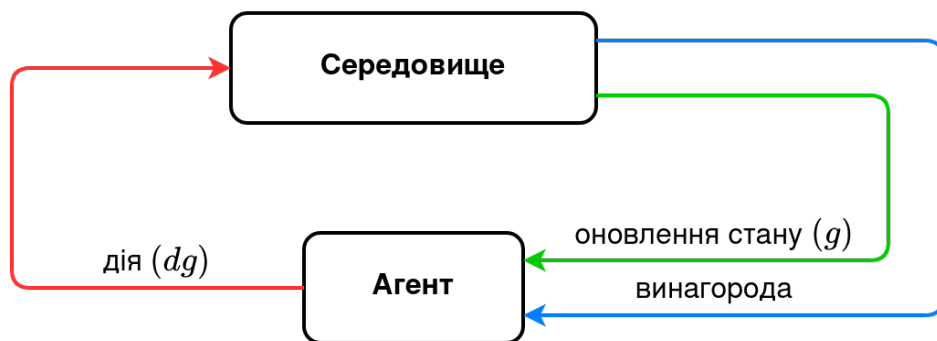


Рис. 1.13. Ілюстрація загального алгоритму навчання з підкріпленням.

З цього погляду, розв’язок оберненої задачі як задачі для навчання з підкріпленням знаходиться більш випадковим шляхом, використовуючи бажану ціль  $s^*$  як винагороду та знаходячи найбільш підходящий набір параметрів з простору станів [68]—[71].

Агент зазвичай зіштовхується з досить динамічним середовищем, де отримання винагороди супроводжується створенням механізмів для пошуку чи розвідування ніж простого вибору дії випадковим чином.

Якщо RL використовується як оптимізаційний метод для розв’язку обернених задач, моделі не страждають від проблеми відношення “один до ба-

гатьох”, так як застосовуються різні початкові параметри та доданий фактор стохастичного пошуку дає декілька розв’язків для однієї цілі. Попри це, такий пошуковий алгоритм інколи може бути повільніший за звичайні методи оптимізації, особливо з погано підбраною функцією винагороди [72]. Також існує взаємозалежність між пошуком рішення і його ефективністю, це більшою мірою залежить від природи і структури даних.

Варто зазначити, так як наступний стан агента не є апіорі відомим, і запропоновані вектори даних можуть не бути явно оціненими - це призводить до необхідності прогонів прямої моделі при кожній ітерації (епізоді).

Також існує негативний фактор того, що RL досить погано масштабується при збільшенні простору даних і є найбільш ефективною коли простір залишається відносно малим [73].

**1.4.2. Тандемна нейронна мережа.** Один з найбільш розповсюджених підходів, що долає проблему неунікальності, це додавання прямої моделі до моделі оберненої задачі з DNN, тобто створення каскадної моделі, так званої тандемної нейронної мережі [74]—[76].

Покращений підхід використання тандемної нейромережі був описаний в роботі [74]. Авторами використовувалася тандемна структура DNN, що поєднувала мережу для оберненої задачі і вже навчену пряму модель рис. 1.14. При такому підході, в першій фазі навчається мережа, що відтворює відгук прямої моделі. В другій фазі навчання, ваги прямої моделі фіксуються і вона приєднується до мережі оберненої задачі та відбувається навчання мережі оберненої задачі. При цьому бажаний вихід служив як вхідні дані, та мережа навчалась мінімізуючи “втрати”, тобто різницю між бажаним відгуком і відтвореним результатом. На етапі відтворення обернена модель самотужки здатна відтворювати потрібний відгук. Під час цього вихідні параметри бралися вже з проміжного шару. Як зазначається, цей підхід допомагає побороти проблему неунікальності в розв’язку обернених задач, так як підхід не вима-

гає специфічний набір параметрів для певного відгуку.

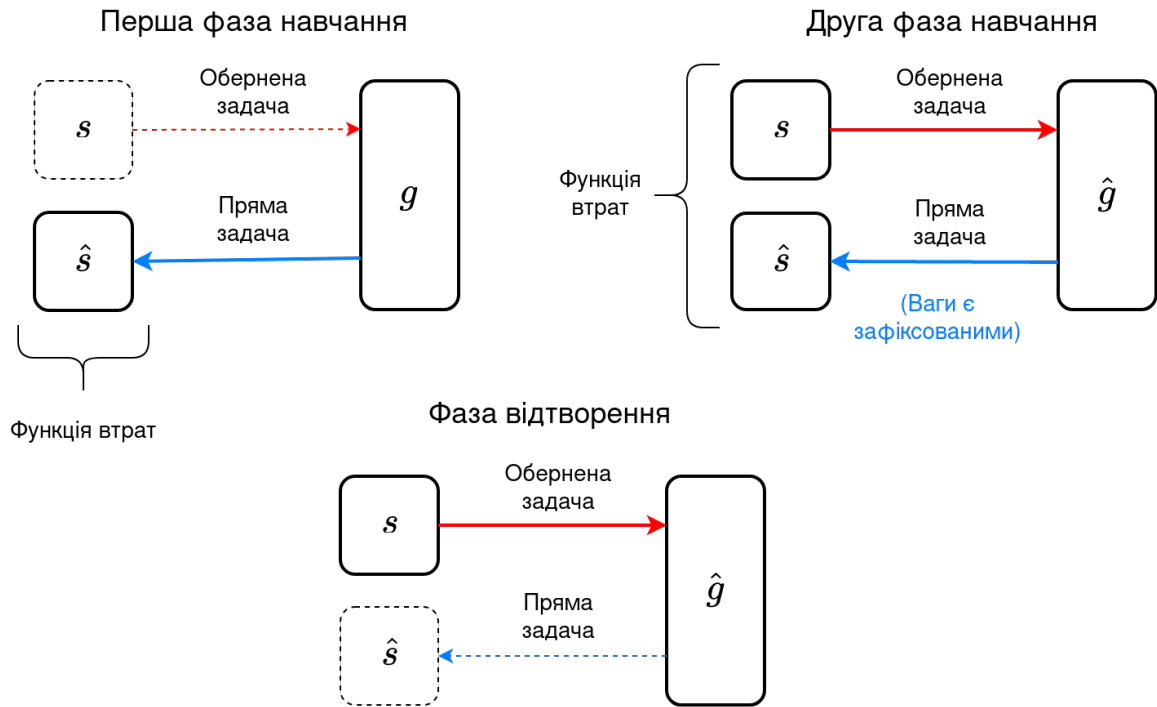


Рис. 1.14. Концепція тандемної нейронної мережі.

Тандемна мережа хоч і долає проблему неунікальності, але при цьому не має варіативності виходу, тобто в результаті ми можемо отримати тільки один варіант розв'язку, який обумовлений навчанням. Іншим недоліком є те, що тандемні нейромережі потребують досить чималого набору даних для коректного навчання.

**1.4.3. Генеративна змагальна мережа.** Генеративна змагальна мережа (generative adversarial network, GAN) є досить недавно розробленим алгоритмом машинного навчання, але цей алгоритм став найбільш цікавим з групи методів навчання без учителя [77].

GAN складаються з двох мереж генератора (generator) та дискримінатора (discriminator) рис. 1.15. Дві мережі поєднуються і одночасно навчаються по принципу гри з нульовою сумою. Мережа генератор приймає на вхід випадковий шум і генерує варіанти наборів даних, які мають бути бажаними вихі-

дними параметрами. В той же час мережа дискримінатор перевіряє чи згенеровані виходи є даними, що задовольняють умови задачі. Задача генеративної мережі - це підміна даних (обман) для дискримінантної мережі, що вона реалізує генерацією реалістично подібних даних. Генератор формує випадковий шум  $z$ , з можливим розподіленням по поверхні відгуку  $s$ . Дискримінатор намагається визначити чи вхідне значення  $\hat{g}$  є істинним - тобто змагається з моделлю генератором.

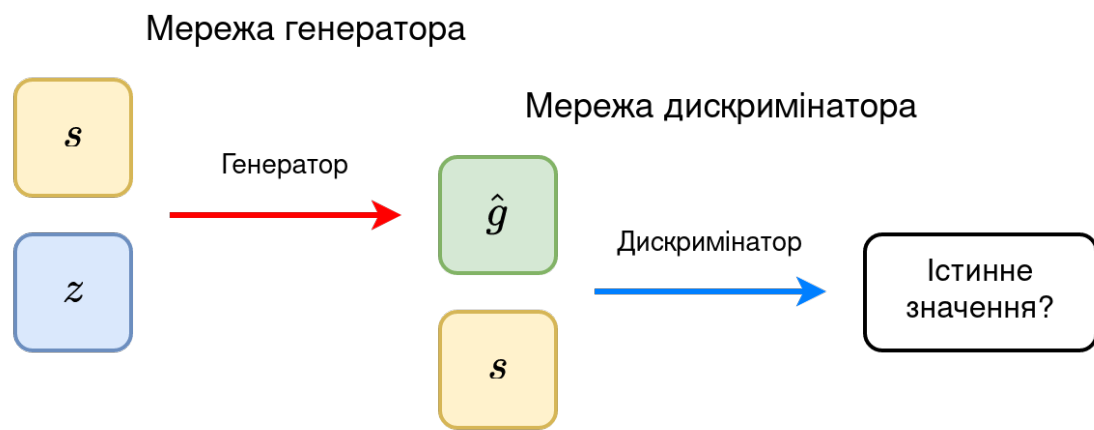


Рис. 1.15. Схема генеративної змагальної мережі адаптованої під розв'язання обернених задач.

І тому, після навчання, генеративна мережа може створювати дизайни структури, що нагадують образи справжніх даних. В тому числі генеративна мережа виводить важливі закономірності з даних через зворотній зв'язок.

В дослідженні [61] автори додатково до моделі GAN додали мережу симуляції, щоб апроксимувати вихідні параметри. Після навчання, мережа була здатна відтворювати потрібний вихід.

Варто зазначити, що GAN генерують довільні структурні шаблони, що допомагають відкрити нові форми цих структур за межами людського розуміння побудованого на досвіді та знаннях. Та попри це, хоч GAN і вирішують нестійку проблему рівноваги Неша (Nash Equilibrium), вони також не завжди дають стійке рішення.

Недавні дослідження показали, що глибокі зворотні GANs [78] є ефективними при розв'язку обернених задачах, та можуть вирішити проблему гри з нульовою сумою в більш стабільний спосіб [62].

Так як GAN часто використовуються для ідентифікації реальної структури параметрів вхідних даних з занадто параметризованого простору, як наприклад, дані зображень, тому нейромережі цього типу вимагають скрупульозного підбору даних при створенні випадкових вибірок для навчання [72].

Також відомо, що в GANs проявляється проблема вибору при деяких режимах (mode collapse) [79], коли мережа дискримінатора намагається обрати лише певні набори згенерованих вихідних даних. І в подальшому, так би мовити, застрягаючи в певній підвибірці без дослідження всього простору поверхні відгуку.

Так як GANs це по суті дві конкуруючі мережі, одночасне навчання цих двох DNNs є досить складним [80].

Навіть показуючи хороші результати при певних вибірках, GAN схильні до проблеми режимів. Коли GAN є добре та правильно натренованою, мережі цього типу можуть показувати вражаючі результати, особливо в поєднанні з традиційними методами оптимізації [81], [82], та зазвичай це супроводжується втратою додаткового часу на розробку і налагодження самої моделі.

Описані вище недоліки є перешкодою до вибору GAN як оптимального інструменту при розв'язку обернених задач.

**1.4.4. Автокодувальники та варіаційні автокодувальники.** Автокодувальник (autoencoder, AE) це загальна назва виду нейронних мереж, що по своїй структурі призначена без учителя навчатися та виділяти особливості з певного набору даних. Цей концепт машинного навчання походить з 1980-х [83].

Існує два види автокодувальників, що використовувалися для розв'язку обернених задач, це детермінований (deterministic autoencoder) та варіацій-

ний автокодувальники (variational autoencoder, VAE).

Детермінований автокодувальник служить для зменшення простору даних в менший латентний простір. В загальному структура автокодувальника складається з мережі кодувальника (encoder) та мережі декодувальника (decoder). Дані, проходячи через мережу кодувальника стискаються в менший кодований простір - латентний простір, а задача мережі декодувальника відтворювати оригінальний набір даних з значень латентного простору. Зазвичай значення латентного простору визначені як  $z$ , та не можуть бути прямо оцінені, але  $z$  є напряду визначеним з опрацьованих автокодувальником даних. Моделі з використанням автокодувальників є цікавими для стиснення простору даних в розв'язку обернених задач [84], [85]. Завдяки автокодувальникам проблема відношення даних “один до багатьох” може бути неявно вирішена через латентний простір [85].

Варіаційний автокодувальник в розв'язку обернених задач має дещо інше призначення та є найбільш використовуваним типом автокодувальників.

VAE належить до класу потужних генераторних мереж [86], що відтворюють вхід після того, як він був зжятий в декілька прихованих змінних.

На відміну від інших методів розв'язку обернених задач, мережа приймає на вхід дані, які потім закодує в приховані змінні з визначеними раніше розподіленнями.

Моделі на основі VAE є генераторними моделями, основна задача яких навчитися розподілу вхідних даних, використовуючи ймовірність розподілення як значення латентного ( $\mu_z, \sigma_z$ ) простору рис. 1.16 [87].

Натренована нейромережа VAE може відтворювати зразки з нового заданого вектора латентного простору, що потім, будучи декодованим, може бути інтерпретований як дані. І саме тому VAE є генераторним типом нейромереж, що можуть генерувати нові структури даних з подібними властивостями до тих даних на яких була ця нейромережа натренована [63], [88]—[93].

Так як VAE навчається як закодувати  $g$  в латентний простір, не існує ні-

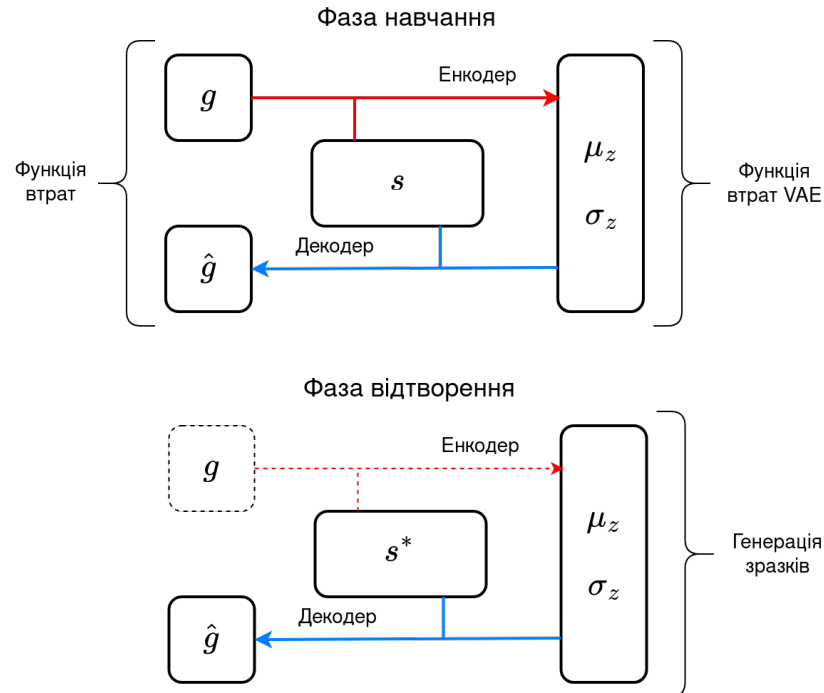


Рис. 1.16. Архітектура нейромережі варіаційного енкодера.

якого зв'язку з цільовим розподілом  $s$ , що є вбудованим в базову структуру VAE. Тож для навчання потрібна пряма модель чи сурогатна модель прямої задачі, щоб коректувати навчання самого VAE та додавати додаткові умови до функції втрат [91], або обраховувати чи відгук є задовільним перед мережею декодувальника [90].

VAE за своєю природою вирішує проблему відношення даних “один до багатьох” вважаючи, що для кожного  $s$  існує декілька можливих варіацій рішення  $\hat{g}$  з різноманітним набором цих комбінацій з латентного простору  $z$ , що відповідає Гауссовому розподіленню. Так головною перевагою VAE є те, що він може давати декілька можливих рішень для певного  $s^*$ .

Розглядаючи недоліки VAE варто зазначити, що мережа намагається згенерувати можливі розподілення використовуючи варіаційний підхід та введення явної границі нижнього значення (the evidence lower bound, ELBO), що є чисельно оптимізованою функцією втрат та є означеною як функція втрат для реконструкції поєднаною з регуляризаційною умовою дивергенції Кульбака–

Лейблера (KL divergence). Такий тип ELBO як функції втрат є складним для обчислення [87].

До того ж отриманий латентний простір зазвичай є довільним та потребує підстройки параметрів протягом декількох ітерацій навчання. Відтворені дані від VAE є злегка зашумленими особливо у випадку невдалого вибору або великої розмірності латентного простору [72].

Так як мережі VAE навчаються відтворювати розподіл можливих  $g$  від  $s$ , природа таких залежностей невідома без послідовної побудови таких розподілень вручну. Тому хоч VAE і можуть ментально створювати вихід  $\hat{g}$  та перший отриманий результат не завжди є найкращим. Тому без знання залежності розподілу все ж таки можна використовувати повторну симуляційну помилку, щоб оцінити здатність мережі відтворювати адекватний вихід  $\hat{g}$ , та це вимагає додаткових кроків оптимізації. Тож з практичної точки зору VAE є досить складними в навчанні ніж моделі на основі звичайних DNN та тандемні нейромережі.

**1.4.5. Інверсійні нейронні мережі.** Інверсні нейронні мережі Invertible Neural Networks (INNs) були в повній мірі представлені в роботі Ardizzone et al. (2018) [94]. Дослідники показали ефективне застосування такого підходу для різного роду задач в природничих науках.

INN покликані вирішити проблему неоднозначності при розв'язку обернених задач без додаткових зусиль чи оптимізацій. Як зазначають автори при використанні INN можна сфокусуватися на прямому навчанні нейромережі, використовуючи лише додаткові приховані змінні при навчанні в функції втрат.

Суть інверсної нейромережі заключається в наступному: мережу можна навчити добре зрозумілому прямому процесу  $x \rightarrow y$  та потім просто отримати обернений розв'язок  $y \rightarrow x$ . Для досягнення такого результату було створено латентний вихідний простір  $z$ , що запобігає втраті прихованої ін-



формації при прямому навчанні. Цей простір може містити в собі саме ту інформацію про  $x$ , що не міститься в  $y$ . Тож INN навчається зв'язувати приховані параметри про  $x$  в унікальних парах  $[y, z]$  тобто змінних відгуку та латентних змінних. При навчанні прямій задачі INN намагається відобразити відношення  $[y, z] = f(x)$  і таким чином неявно можна визначити її інверсію  $x = f^{-1}(y, z) = g(y, z)$ . Латентний простір  $p(z)$  сформований за Гаусівським розподілом. Тож INN відображає бажане відображення даних  $p(x|y)$  за функцією визначником  $x = g(y, z)$ , що змушує за відомим розподілом  $p(z)$  відповідати простору  $x$  при певних  $y$ .

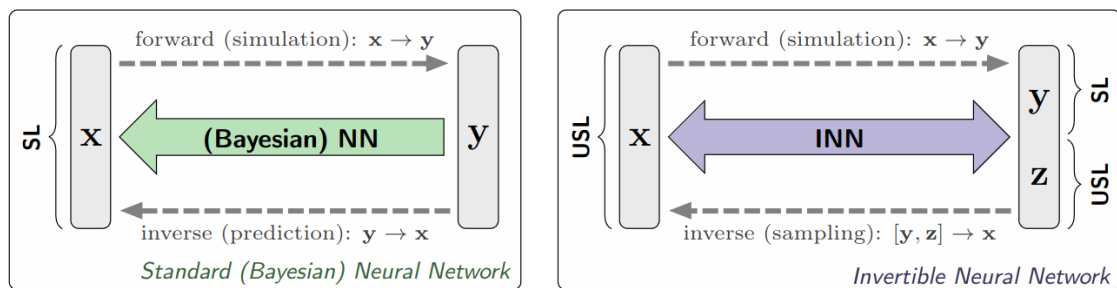


Рис. 1.17. Загальне порівняння звичайної і інверсної нейронної мережі [94].

Недоліком INN є те, що все таки зачасто приходится вводити додаткові змінні при процесі навчання і використовувати їх у функції втрат як штрафи чи додаткові коефіцієнти. Іншим негативним фактором є симетрична архітектура таких мереж, тобто кількість виходів має дорівнювати кількості входів. Це призводить до додаткових незручностей та похибок в при розрахунку функції цілі. Також слід зазначити, що ці мережі схильні до поганого опрацювання даних при досить великій розмірності входів-виходів та якщо дані певною мірою відрізняються від навчальної вибірки.

**1.4.6. Гібридні методи оптимізації з глибокими нейронними мережами.** Довгий час для розв'язку обернених задач використовувалися числові методи оптимізації. Наприклад такі оптимізаційні підходи, що ґрунтуються на градієнтних методах як: level-set, density topology, та interior point methods

[95], а також генетичні (genetic) чи еволюційні (evolutionary) алгоритми [96], [97].

Багато підходів до розв'язку обернених задач покладаються на adjoint variables method [98]—[100], в якому ціллю є обрахунок зразків для  $f^{-1}$  для конкретної  $g$ , чим на тому щоб знайти саму функцію  $f^{-1}$ . Це притаманно випадкам, що вимагають специфічні знання в конкретній області, навіть тоді, коли фізика процесу менш зрозуміла.

Замість того щоб використовувати стандартні моделі DL, DNNs також можуть бути поєднані з класичними оптимізаційними методами для розв'язку обернених задач. Такий підхід прийнято називати гібридним [72].

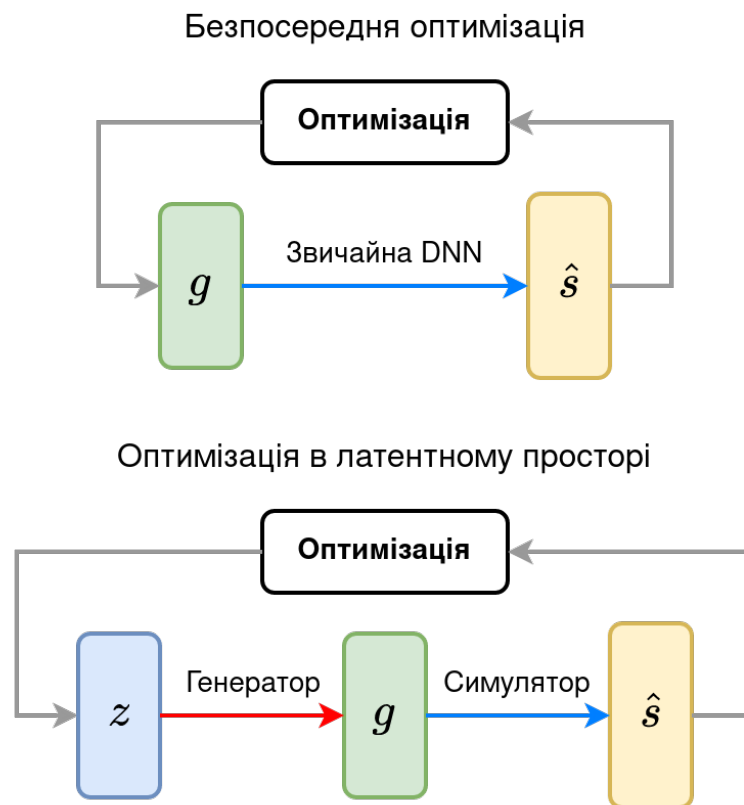


Рис. 1.18. Загальна схема підходів до розв'язку обернених задач засобами гібридної оптимізації.

Як показано на рис. 1.18, існує два базових сценарія гібридної оптимізації з DL: це пряма оптимізація і оптимізація у латентному просторі. У ви-

падку прямої оптимізації сурогатна модель використовується частково чи як повний заміник прямої моделі. Як приклад, використовуються еволюційні алгоритми, щоб керувати простором даних  $g$  [101]. В моделях, що використовують оптимізацію у латентному просторі основною метою є зменшення розмірності представлення латентного простору, що знову відповідає (накладається)  $g$ , так як оптимізаційний процес проходить ефективніше з простором, що має меншу розмірність.

Моделі на основі сурогатних DNNs є ключовим засобом покращення процесу оптимізації, так як через свою швидкою, дозволяють оптимізаційним алгоритмам бути ефективнішими, в тому числі надавати кращі початкові точки пошуку [91], [92]. Варто зазначити, що через зменшення розмірності можливо суттєво спростити розв’язок задачі без необхідності боротьби з проблемою відношення “один до багатьох” [85], так як оптимізаційні методи можуть покращити згенероване рішення  $\hat{g}$  через ітеративні підходи.

Наприклад, вже були створені підходи до розв’язку обернених задач з застосуванням нейромережевої сурогатної оптимізації в поєднанні з традиційними оптимізаційними методами, такими як: еволюційні алгоритми (evolutionary strategies, ES), генетичні алгоритми (genetic algorithms, GA), та метод рою часток (particle swarm optimization, PSO) [85], [91], [101]—[109].

Інша група гібридних моделей включає поєднання генераторних мереж з вторинними процедурами оптимізації, що ітеративно покращують рішення. Ці гібридні моделі використовують оптимізаційний метод приєднання станів (adjoint-based topology optimization) [81], [82], [92] чи еволюційні алгоритми [91].

Інші підходи вдаються до розв’язку обернених задач з використанням DNNs з Баєсовим (Bayesian) розв’язком [47], [110], [111], методом внутрішніх точок [51], усіченою Ньютонівською оптимізацією (truncated Newtonian optimization) [112], а також методом пошуку по таблицям (search-based lookup tables) [113]—[115].

Методи, що основані на гібридних підходах з DNN можуть справлятися з задачами швидше і ефективніше, так як вони спрощують обчислювальну складову оптимізаційного процесу. В загальному, методи з використанням сурогатних DNNs та звичайної оптимізації можуть бути застосовані до розв'язку обернених задач.

Недоліком такого підходу є те, що зачасту в задачах є спеціальні фізичні чи технічні обмеження, що в свою чергу призводить до застосування додаткових алгоритмів чи ускладнень загального алгоритму. Через це конкретні методи стають вже вузькоспеціалізованими, та доводиться витратити додатковий час на тестування та налагодження таких алгоритмів та моделей.

### **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. Щоб виконати поставлену дисертаційну задачу, першочерговим є огляд наявних досліджень та підходів до розв'язку задач в цих дослідженнях. Проаналізовано можливість застосування приведених підходів та методів для вихрострумового неруйнівного контролю в відповідності до теми дисертаційного дослідження.

Як відомо, для розв'язку оберненої задачі потрібно неодноразово знаходити результат прямої задачі. В дослідженні було обрано підхід з застосуванням сурогатних моделей, детальний аналіз яких було зроблено в підпункті 1.2 дисертації. Так як евристичні сурогатні моделі на основі штучних нейронних мереж не потребують використання значних обчислювальних ресурсів та успішно виконують функції моделі-замісника — це є одним з найкращих методів при розв'язку обернених задач в реальному масштабі часу. Сурогатні моделі такого типу забезпечують високу швидкодію та точність при необхідності апроксимації складних нелінійних функцій з великою кількістю вхо-

дів.

В подальшому для створення адекватної сурогатної моделі та наступного розв’язку оберненої задачі є необхідним мати оптимальний план експерименту, щоб рівномірно дослідити поверхню відгуку досліджуваної моделі, топологія якої априорі не є відомою. Такі оптимальні плани можна отримати за допомогою квазі-випадкових послідовностей, найкращими з яких є Sobol та R послідовності. Плани експерименту, сформовані за такими послідовностями, забезпечують однорідність розподілу точок і поліпшення точності числових експериментів, що на пряму впливає на швидкість обчислення комп’ютерних моделей та симуляцій.

Завершальним та ключовим етапом цього розділу є розгляд засобів для розв’язку оберненої задачі, а саме підходів з використанням глибоких нейронних мереж як передового і ефективного інструменту, альтернативного оптимізації. Нейромережі завдяки своїй узагальнюючим властивостям, мають якості універсальних апроксиматорів, без проблем здатні забезпечити високу точність відтворення досліджуваної гіперповерхні на всій області визначення та можуть застосовуватися безпосередньо у вимірювальних операціях, що дозволяє забезпечити розв’язок обернених задач в реальному масштабі часу.

## 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=FILA=&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=FILA=&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>.
9. A. Ayad, F. Benhamida, A. Bendaoud, Y. Le Bihan, and M. Bensetti, “Solution of inverse problems in electromagnetic ndt using neural networks”, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 87, no. 9a, pp. 330–333, 2011. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Farid-Benhamida/publication/278762320\\_Solution\\_of\\_Inverse\\_Problems\\_in\\_Electromagnetic\\_NDT\\_Using\\_Neural\\_Networks/links/55d3654e08aec1b0429f37c7/Solution-of-Inverse-Problems-in-Electromagnetic-NDT-Using-Neural-Networks.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Farid-Benhamida/publication/278762320_Solution_of_Inverse_Problems_in_Electromagnetic_NDT_Using_Neural_Networks/links/55d3654e08aec1b0429f37c7/Solution-of-Inverse-Problems-in-Electromagnetic-NDT-Using-Neural-Networks.pdf?origin=publication_detail).
10. J. Burkhardt, “Determination of the conductivity and thickness of conductive layers on conductive base materials”, *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 11, pp. 1–9, 7 2019. doi: 10.1177/1687814019854234. [Online]. Available: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1687814019854234>.
11. X. Chen and Y. Lei, “Electrical conductivity measurement of ferromagnetic metallic materials using pulsed eddy current method”, *NDT E Int.*, vol. 75, pp. 33–38, 2015. doi: 10.1016/j.ndteint.2015.06.005.
12. N. Ulapane, A. Alempijevic, T. Vidal Calleja, and J. Valls Miro, “Pulsed eddy current sensing for critical pipe condition assessment”, *Sensors*, vol. 17,

- no. 10, 2017, Art. no. 2208. doi: 10.3390/s17102208. [Online]. Available: [https://mdpi-res.com/d\\_attachment/sensors/sensors-17-02208/article\\_deploy/sensors-17-02208.pdf](https://mdpi-res.com/d_attachment/sensors/sensors-17-02208/article_deploy/sensors-17-02208.pdf).
13. A. C. Lahrech, B. Abdelhadi, M. Feliachi, A. Zaoui, and M. Naïdjate, “Electrical conductivity identification of a carbon fiber composite material plate using a rotating magnetic field and multi-coil eddy current sensor”, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, vol. 83, no. 2, 2018, Art. no. 20901. doi: 10.1051/epjap/2018170411.
  14. I. T. Rekanos, T. P. Theodoulidis, S. M. Panas, and T. D. Tsiboukis, “Impedance inversion in eddy current testing of layered planar structures via neural networks”, *NDT & E International*, vol. 30, no. 2, pp. 69–74, 1997, Department of Electrical and Computer Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, GR-54006, Thessaloniki, Greece, issn: 0963-8695. doi: 10.1016/S0963-8695(96)00047-3. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869596000473>.
  15. T. Theodoulidis, “Impedance of a coil above a planar conductor with an arbitrary continuous conductivity depth profile”, *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, vol. 59, no. 4, pp. 1179–1185, 2019. doi: 10.3233/JAE-171122.
  16. W. Yin and A. J. Peyton, “Determining the step-change conductivity profile within layered metal structures using inductance spectroscopy”, in *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Sorrento, 2006, pp. 2127–2131. doi: 10.1109/IMTC.2006.328503. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/224062939\\_Determining\\_the\\_Step-change\\_Conductivity\\_Profile\\_within\\_Layered\\_Metal\\_Structures\\_Using\\_Inductance\\_Spectroscopy](https://www.researchgate.net/publication/224062939_Determining_the_Step-change_Conductivity_Profile_within_Layered_Metal_Structures_Using_Inductance_Spectroscopy).
  17. A. I. J. Forrester, A. Sóbester, and A. J. Keane, *Engineering Design via Surrogate Modelling: A Practical Guide*. Chichester: Wiley, 2008.
  18. М. А. Чубань, “Аппроксимация поверхности отклика для использования в процессе параметрического синтеза машиностроительных констру-



- кций”, *Вестник Нац. техн. ун-та ”ХПИ”*, т. 43, № 1152, с. 161—164, 2015.
19. O. U. Espinosa Barcenas, J. G. Quijada Pioquinto, E. Kurkina, and O. Lukyanov, “Surrogate aerodynamic wing modeling based on a multi-layer perceptron”, *Aerospace*, vol. 10, no. 2, 2023, issn: 2226-4310. doi: 10 . 3390 / aerospace10020149. [Online]. Available: [https : //www.mdpi .com/2226-4310/10/2/149](https://www.mdpi.com/2226-4310/10/2/149).
  20. M. R. Garifullin, A. V. Barabash, E. A. Naumova, O. V. Zhuvak, T. Jokinen, and M. Heinisuo, “Surrogate modeling for initial rotational stiffness of welded tubular joints”, *Magazine of Civil Engineering*, no. 3, pp. 53–76, 2016. doi: 10 . 5862/MCE . 63 . 4.
  21. S. Koziel and X.-S. Yang, *Computational Optimization, Methods and Algorithms*. Berlin: Springer-Verlag, 2011, pp. 33–59.
  22. В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, В. В. Тичков та А. В. Сторчак, “Методи створення метамodelей: стан питання”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4 (151), с. 74—88, 2020. doi: 10 . 31649 / 1997 – 9266-2020-151-4-74-88.
  23. B. Grimstad, P. M. Robertson, and B. Foss, “Virtual flow metering using b-spline surrogate models”, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 6, pp. 292–297, 2015, 2nd IFAC Workshop on Automatic Control in Offshore Oil and Gas Production OOGP 2015, issn: 2405-8963. doi: [https : //doi .org/10 . 1016 / j . ifacol . 2015 . 08 . 046](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.046). [Online]. Available: [https : // www . sciencedirect .com/science/article/pii/S2405896315009131](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315009131).
  24. С. Г. Радченко, “Анализ методов моделирования сложных систем”, *Математичні машини і системи*, № 4, с. 123—127, 2015.
  25. J. Friedman, “Multivariate adaptive regression splines (with discussion)”, *Annals of Statistics*, no. 19, pp. 1–141, 1991.
  26. D. J. C. MacKay, *Information Theory, Inference and Learning Algorithms*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

27. S. Bilicz, M. Lambert, S. Gyimothy, and J. Pavo, “Solution of inverse problems in nondestructive testing by a kriging-based surrogate model”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 2, pp. 495–498, 2012. doi: 10.1109/TMAG.2011.2172196.
28. E. V. Burnaev, M. Panov, D. Kononenko, and I. Konovalenko. “Sravnitel’nyj analiz procedur optimizacii na osnove gaussovskih processov[comparative analysis of optimization procedures based on gaussian processes]”. in Russian. Data obrashhenija: Nojabr’ 04, 2015. (2012), [Online]. Available: <http://itas2012.iitp.ru/pdf/1569602385.pdf>.
29. E. V. Burnaev, M. E. Panov, and A. A. Zajcev, “Regressija na osnove nestacionarnyh gaussovskih processov s bajesovskoj reguljarizaciej[regression based on non-stationary gaussian processes with bayesian regularization]”, in Russian, *Informacionnye processy*, vol. 15, no. 3, pp. 298–313, 2015.
30. E. V. Burnaev, P. D. Erofeev, and P. V. Prihod’ko, “Vydelenie glavnyh napravlenij v zadache approksimacii na osnove gaussovskih processov[extraction of principal directions in the problem of approximation based on gaussian processes]”, in Russian, *Trudy MFTI*, vol. 5, no. 3, pp. 24–35, 2013.
31. H. Fang and M. F. Horstemeyer, “Global response approximation with radial basis functions”, *Engineering Optimization*, vol. 38, no. 4, pp. 407–424, 2006. doi: 10.1080/03052150500422294.
32. S. De Marchi, *Lectures on radial basis functions*, Department of Mathematics “Tullio Levi-Civita”, University of Padua (Italy), Feb. 2018.
33. А. Г. Ивахненко, *Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем*. Киев: Наукова Думка, 1982.
34. A. G. Ivakhnenko and G. A. Ivakhnenko, “The review of problems solvable by algorithms of the group method of data handling (gmdh)”, *International Journal of Pattern Recognition and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications*, vol. 5, no. 4, pp. 527–535, 1995.

35. “GMDH – General description of the GMDH”. (2014), [Online]. Available: [http://www.gmdh.net/GMDH\\_abo.htm](http://www.gmdh.net/GMDH_abo.htm).
36. “GMDH – Spectrum of the GMDH algorithms”. (2014), [Online]. Available: [https://www.gmdh.net/GMDH\\_alg.htm](https://www.gmdh.net/GMDH_alg.htm).
37. F. Parrella, “Online support vector regression”, 2007. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:61599691>.
38. S. Haykin, *Neural networks and learning machines*. 2009.
39. Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко та В. В. Тичков, “Побудова MLP-метамоделі накладного вихрострумового перетворювача для задач сурогатного оптимального синтезу”, *Технічні вісми*, № 1 (47), с. 27—31, 2018. url: <https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/462/1/27.pdf>.
40. A. Géron, *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow*. O’Reilly Media, 2019.
41. M. Roberts. “The unreasonable effectiveness of quasirandom sequences”. (May 2018), [Online]. Available: <http://extremelearning.com.au/unreasonable-effectiveness-of-quasirandom-sequences/>.
42. J. Struckmeier, “Fast generation of low-discrepancy sequences”, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 61, no. 1, pp. 29–41, 1995. [Online]. Available: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377042794000545?ref=pdf\\_download&fr=RR-2&rr=75b9ca707d2fb700](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377042794000545?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=75b9ca707d2fb700).
43. V. Y. Halchenko, M. D. Koshoviy, and R. V. Trembovetska, “Homogeneous plans for multifactor experiments on quasirandom r-sequences of roberts for surrogate modeling in eddy current structure scanning”, *Radioelectronics, Informatics, Control*, vol. 62, no. 3, pp. 22–30, 2022. doi: 10.15588/1607-3274-2022-3-2. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-3-2>.
44. 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. doi: 10.2478/acss-2020-0009.
45. J. Peurifoy and et al., “Nanophotonic particle simulation and inverse design using artificial neural networks”, *Science Advances*, vol. 4, no. 6, 2018, Art. no. eaar4206. doi: 10.1126/sciadv.aar4206. [Online]. Available: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/sciadv.aar4206>.
  46. Y. Qu, L. Jing, Y. Shen, M. Qiu, and M. Soljačić, “Migrating knowledge between physical scenarios based on artificial neural networks”, *ACS Photonics*, vol. 6, pp. 1168–1174, 2019.
  47. I. Balin, V. Garmider, Y. Long, and I. Abdulhalim, “Training artificial neural network for optimization of nanostructured vo2-based smart window performance”, *Optics Express*, vol. 27, no. 16, 2019, Art. no. A1030–A1040. doi: 10.1364/OE.27.0A1030.
  48. J. Baxter, A. Calà Lesina, J. M. Guay, A. Weck, P. Berini, and L. Ramunno, “Plasmonic colours predicted by deep learning”, *Scientific Reports*, vol. 9, 2019, Art. no. 8074. doi: 10.48550/arXiv.1902.05898.
  49. Y. Kiarashinejad, M. Zandehshahvar, S. Abdollahramezani, O. Hemmatyar, R. Pourabolghasem, and A. Adibi, “Knowledge discovery in nanophotonics using geometric deep learning”, *Advanced Intelligent Systems*, vol. 1900132, 2019. doi: 10.1002/aisy.201900132.
  50. I. Sajedian, J. Kim, and J. Rho, “Finding the optical properties of plasmonic structures by image processing using a combination of convolutional neural networks and recurrent neural networks”, *Microsystems & Nanoengineering*, vol. 5, 2019, Art. no. 27. doi: 10.1038/s41378-019-0069-y.
  51. S. Inampudi and H. Mosallaei, “Neural network based design of metagratings”, *Applied Physics Letters*, vol. 112, no. 24, Jun. 2018, Art. no. 241102, issn: 0003-6951. doi: 10.1063/1.5033327. eprint: [https://pubs.aip.org/aip/apl/article-pdf/doi/10.1063/1.5033327/14511760/241102\\\_1\\\_online.pdf](https://pubs.aip.org/aip/apl/article-pdf/doi/10.1063/1.5033327/14511760/241102\_1\_online.pdf).

52. C. C. Nadell, B. Huang, J. M. Malof, and W. J. Padilla, “Deep learning for accelerated all-dielectric metasurface design”, *Opt. Express*, vol. 27, no. 20, pp. 27 523–27 535, Sep. 2019. doi: 10 . 1364 / OE . 27 . 027523. [Online]. Available: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-27-20-27523>.
53. D. Liu, Y. Tan, E. Khoram, and Z. Yu, “Training deep neural networks for the inverse design of nanophotonic structures”, *ACS Photonics*, vol. 5, pp. 1365–1369, 2018. doi: 10.1021/acsphotonics.8b00222.
54. R. Caruana and A. Niculescu-Mizil, “An empirical comparison of supervised learning algorithms”, in *Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning*, ser. ICML '06, Pittsburgh, Pennsylvania, USA: Association for Computing Machinery, 2006, pp. 161–168, isbn: 1595933832. doi: 10.1145/1143844.1143865. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/1143844.1143865>.
55. S. So, J. Mun, and J. Rho, “Simultaneous inverse design of materials and structures via deep learning: Demonstration of dipole resonance engineering using core–shell nanoparticles”, *ACS Appl Mater Interf*, vol. 11, 2019, Art. no. 24264–8.
56. I. Malkiel, M. Mrejen, A. Nagler, U. Arieli, L. Wolf, and H. Suchowski, “Plasmonic nanostructure design and characterization via deep learning”, *Light: Science & Applications*, vol. 7, p. 60, 2018. doi: 10 . 1038 / s41377 - 018 - 0063 - 2.
57. T. A. and S. N., “Optimization of photonic crystal nanocavities based on deep learning”, *Opt. Express*, vol. 26, no. 25, pp. 32 704–32 717, Dec. 2018. doi: 10 . 1364 / OE . 26 . 032704. [Online]. Available: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-26-25-32704>.
58. O. Hemmatyar, S. Abdollahramezani, Y. Kiarashinejad, M. Zandehshahvar, and A. Adibi, “Full color generation with fano-type resonant hfo2 nanopillars designed by a deep-learning approach”, *Nanoscale*, vol. 11, pp. 21 266–

- 21 274, 44 2019. doi: 10.1039/C9NR07408B. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1039/C9NR07408B>.
59. H. B. Barlow, “Unsupervised learning”, *Neural Computation*, vol. 1, no. 3, pp. 295–311, Sep. 1989, issn: 0899-7667. doi: 10.1162/neco.1989.1.3.295. eprint: <https://direct.mit.edu/neco/article-pdf/1/3/295/811863/neco.1989.1.3.295.pdf>.
  60. T. Hofmann, “Unsupervised learning by probabilistic latent semantic analysis”, *Machine Learning*, vol. 42, pp. 177–196, 2001. doi: 10.1023/A:1007617005950.
  61. Z. Liu, D. Zhu, S. P. Rodrigues, K.-T. Lee, and W. Cai, “Generative model for the inverse design of metasurfaces”, *Nano Letters*, vol. 18, no. 10, pp. 6570–6576, Sep. 2018, issn: 1530-6992. doi: 10.1021/acs.nanolett.8b03171.
  62. S. So and J. Rho, “Designing nanophotonic structures using conditional deep convolutional generative adversarial networks”, *Nanophotonics*, vol. 8, pp. 1255–1261, 2019.
  63. W. Ma, F. Cheng, Y. Xu, Q. Wen, and Y. Liu, “Probabilistic representation and inverse design of metamaterials based on a deep generative model with semi-supervised learning strategy”, *Advanced Materials*, vol. 31, no. 35, 2019, Art. no. 1901111. doi: 10.1002/adma.201901111. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adma.201901111>. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201901111>.
  64. J. Jiang, D. Sell, S. Hoyer, J. Hickey, J. Yang, and J. A. Fan, “Free-form diffractive metagrating design based on generative adversarial networks”, *ACS Nano*, vol. 13, no. 8, pp. 8872–8878, 2019, PMID: 31314492. doi: 10.1021/acsnano.9b02371. eprint: <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b02371>. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b02371>.

65. S. An, B. Zheng, H. Tang, *et al.*, “Generative multi-functional metaatom and metasurface design networks”, 2019. arXiv: 1908.04851.
66. V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D. Silver, *et al.*, *Playing atari with deep reinforcement learning*, 2013. arXiv: 1312.5602 [cs.LG].
67. R. S. Sutton and A. G. Barto, *Reinforcement Learning: An Introduction*. MIT Press, 2018, isbn: 978-0262039246.
68. I. Sajedian, T. Badloe, and J. Rho, “Optimisation of colour generation from dielectric nanostructures using reinforcement learning”, *Opt. Express*, vol. 27, no. 4, pp. 5874–5883, Feb. 2019. doi: 10.1364/OE.27.005874. [Online]. Available: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-27-4-5874>.
69. Z. Huang, X. Liu, and J. Zang, “The inverse design of structural color using machine learning”, *Nanoscale*, vol. 11, pp. 21 748–21 758, Dec. 2019. doi: 10.1039/C9NR07945G.
70. T. Badloe, I. Kim, and J. Rho, “Biomimetic ultra-broadband perfect absorbers optimised with reinforcement learning”, *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 22, no. 4, pp. 2337–2342, 2020. doi: 10.1039/C9CP05240E.
71. H. Wang, Z. Zheng, C. Ji, and L. J. Guo, “Automated multi-layer optical design via deep reinforcement learning”, *Machine Learning: Science and Technology*, vol. 2, no. 2, Feb. 2021, Art. no. 025013. doi: 10.1088/2632-2153/abc327. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1088/2632-2153/abc327>.
72. O. Khatib, S. Ren, J. Malof, and W. J. Padilla, “Deep learning the electromagnetic properties of metamaterials—a comprehensive review”, *Adv. Funct. Mater.*, vol. 31, 2021, Art. no. 2101748. doi: 10.1002/adfm.202101748.
73. J. Kober, J. A. Bagnell, and J. Peters, “Reinforcement learning in robotics: A survey”, *The International Journal of Robotics Research*, vol. 32, pp. 1238–1274, Aug. 2013. doi: 10.1177/0278364913495721.

74. W. J. Padilla, M. T. Aronsson, C. Highstrete, M. Lee, A. J. Taylor, and R. D. Averitt, “Electrically resonant terahertz metamaterials: Theoretical and experimental investigations”, *Physical Review B*, vol. 75, Jan. 2007. doi: 10.1103/PhysRevB.75.041102.
75. X. Liu, T. Tyler, T. Starr, A. F. Starr, N. M. Jokerst, and W. J. Padilla, “Taming the blackbody with infrared metamaterials as selective thermal emitters”, *Physical Review Letters*, vol. 107, 4 Jul. 2011, Art. no. 045901. doi: 10.1103/PhysRevLett.107.045901. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.107.045901>.
76. S. Jahani and Z. Jacob, “All-dielectric metamaterials”, *Nature Nanotechnology*, vol. 11, pp. 23–36, Jan. 2016. doi: 10.1038/nnano.2015.304.
77. I. Goodfellow, J. Pouget-Abadie, M. Mirza, *et al.*, “Generative adversarial nets”, in *Advances in Neural Information Processing Systems 27*, NIPS, Montreal, Canada, 2014, pp. 2672–2680.
78. A. Radford, L. Metz, and S. Chintala, “Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks”, *arXiv preprint arXiv:1511.06434*, 2015.
79. N. Kodali, J. Abernethy, J. Hays, and Z. Kira, “On convergence and stability of gans”, *arXiv preprint arXiv:1705.07215*, 2017. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1705.07215>.
80. K. Ganguly, *Learning Generative Adversarial Networks: Next-Generation Deep Learning Simplified*. Birmingham, UK: Packt Publishing, 2017, isbn: 1788396413.
81. J. Jiang and J. A. Fan, “Global optimization of dielectric metasurfaces using a physics-driven neural network”, *Nano Letters*, vol. 19, no. 8, pp. 5366–5372, 2019. doi: 10.48550/arXiv.1906.04157.
82. J. Jiang, D. Sell, S. Hoyer, J. Hickey, J. Yang, and J. A. Fan, “Free-form diffractive metagrating design based on generative adversarial networks”,



- ACS Nano*, vol. 13, no. 8, pp. 8872–8878, 2019. doi: 10.1021/acsnano.9b04668.
83. I. Goodfellow, Y. Bengio, and A. Courville, *Deep Learning*. MIT Press Cambridge, 2016, vol. 1, isbn: 978-0262035613.
  84. Y. Kiarashinejad, S. Abdollahramezani, M. Zandehshahvar, O. Hemmatyar, and A. Adibi, “Deep learning reveals underlying physics of light–matter interactions in nanophotonic devices”, *Advanced Theory and Simulations*, vol. 2, no. 9, 2019, Art. no. 1900088. doi: 10.1002/adts.201900088.
  85. Y. Kiarashinejad, S. Abdollahramezani, and A. Adibi, “Deep learning approach based on dimensionality reduction for designing electromagnetic nanostructures”, *npj Computational Materials*, vol. 6, no. 1, pp. 1–12, 2020. doi: 10.1038/s41524-020-0276-y.
  86. I. Higgins, L. Matthey, A. Pal, and et al., “Beta-vae: Learning basic visual concepts with a constrained variational framework”, in *5th International conference on learning representations*, ICLR, vol. 2, Toulon, France, 2017, p. 6.
  87. D. P. Kingma and M. Welling, “Auto-encoding variational bayes”, arXiv preprint arXiv:1312.6114, Tech. Rep., 2014. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1312.6114>.
  88. T. Qiu, X. Shi, J. Wang, *et al.*, “Deep learning: A rapid and efficient route to automatic metasurface design”, *Advanced Science*, vol. 6, no. 12, 2019. doi: 10.1002/advs.201900128.
  89. X. Shi, T. Qiu, J. Wang, X. Zhao, and S. Qu, “Metasurface inverse design using machine learning approaches”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 53, no. 27, 2020, Art. no. 275105. doi: 10.1088/1361-6463/ab8036.
  90. W. Ma and Y. Liu, “A data-efficient self-supervised deep learning model for design and characterization of nanophotonic structures”, *Science China: Physics, Mechanics and Astronomy*, vol. 63, no. 8, 2020, Art. no. 284212. doi: 10.1007/s11433-020-1575-2.

91. Z. Liu, L. Raju, D. Zhu, and W. Cai, “A hybrid strategy for the discovery and design of photonic structures”, *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 126–135, 2020. doi: 10.1109/JETCAS.2019.2924698.
92. Z. A. Kudyshev, A. V. Kildishev, V. M. Shalaev, and A. Boltasseva, “Machine learning–assisted global optimization of photonic devices”, *Nanophotonics*, vol. 1, no. ahead-of-print, 2020. doi: 10.1515/nanoph-2020-0376.
93. Z. A. Kudyshev, A. V. Kildishev, V. M. Shalaev, and A. Boltasseva, “Machine-learning-assisted metasurface design for high-efficiency thermal emitter optimization”, *Applied Physics Reviews*, vol. 7, no. 2, May 2020, Art. no. 021407, issn: 1931-9401. doi: 10.1063/1.5134792. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.5134792>.
94. L. Ardizzone, J. Kruse, S. Wirkert, *et al.*, *Analyzing inverse problems with invertible neural networks*, 2019. arXiv: 1808.04730 [cs.LG].
95. R. Waltz, J. Morales, J. Nocedal, and D. Orban, “An interior algorithm for nonlinear optimization that combines line search and trust region steps”, *Mathematical Programming*, vol. 107, pp. 391–408, Nov. 2005. doi: 10.1007/s10107-004-0559-y.
96. X. Yu and M. Gen, *Introduction to Evolutionary Algorithms*. Springer Science & Business Media, 2010, isbn: 978-1-84996-128-8.
97. S. Molesky, Z. Lin, A. Y. Piggott, W. Jin, J. Vucković, and A. W. Rodriguez, “Inverse design in nanophotonics”, *Nature Photonics*, vol. 12, no. 11, pp. 659–670, 2018. doi: 10.1038/s41566-018-0246-9.
98. M. P. Bendsøe and N. Kikuchi, “Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 71, no. 2, pp. 197–224, 1988. doi: 10.1016/0045-7825(88)90086-2.
99. J. Herskovits, *Advances in Structural Optimization*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1995, isbn: 978-0-7923-2510-9.

100. R. El Bechari, F. Guyomarch, and S. Brisset, “The adjoint variable method for computational electromagnetics”, *Mathematics*, vol. 10, no. 6, 2022, issn: 2227-7390. doi: 10.3390/math10060885. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2227-7390/10/6/885>.
101. Y. Miyatake, N. Sekine, K. Toprasertpong, S. Takagi, and M. Takenaka, “Computational design of efficient grating couplers using artificial intelligence”, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 59, no. SG, 2020, Art. no. SGGE09. doi: 10.7567/1347-4065/ab641c.
102. M. R. da Silva, C. d. L. Nóbrega, P. H. d. F. Silva, and A. G. D’Assunção, “Optimization of fss with sierpinski island fractal elements using population-based search algorithms and mlp neural network”, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 56, no. 4, pp. 827–831, 2014. doi: 10.1002/mop.28214.
103. Z. Liu, D. Zhu, K. T. Lee, A. S. Kim, L. Raju, and W. Cai, “Compounding meta-atoms into metamolecules with hybrid artificial intelligence techniques”, *Advanced Materials*, vol. 32, no. 6, pp. 1–7, 2020. doi: 10.1002/adma.201904790.
104. Q. Zhang, C. Liu, X. Wan, *et al.*, “Machine-learning designs of anisotropic digital coding metasurfaces”, *Advanced Theory and Simulations*, vol. 2, no. 2, 2019, Art. no. 1800132. doi: 10.1002/adts.201800132. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adts.201800132>.
105. R. S. Hegde, “Photonics inverse design: Pairing deep neural networks with evolutionary algorithms”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 26, no. 1, pp. 1–8, 2019. doi: 10.1109/JSTQE.2019.2933796.
106. R. S. Hegde, “Accelerating optics design optimizations with deep learning”, *Optical Engineering*, vol. 58, no. 6, 2019, Art. no. 065103. doi: 10.1117/1.OE.58.6.065103.

107. T. Zhang, Q. Liu, Y. Dan, *et al.*, “Machine learning and evolutionary algorithm studies of graphene metamaterials for optimized plasmon-induced transparency”, *Optics Express*, vol. 28, Jun. 2020, Art. no. 18899. doi: 10.1364/OE.389231.
108. V. Kalt, A. K. González-Alcalde, S. Es-Saidi, R. Salas-Montiel, S. Blaize, and D. Macías, “Meta-modeling of high-contrast-index gratings for color reproduction”, *JOSA A*, vol. 36, no. 1, pp. 79–88, 2019. doi: 10.1364/JOSAA.36.000079.
109. A. K. González-Alcalde, R. Salas-Montiel, V. Kalt, S. Blaize, and D. Macías, “Engineering colors in all-dielectric metasurfaces: Metamodeling approach”, *Optics Letters*, vol. 45, no. 1, pp. 89–92, 2020. doi: 10.1364/OL.45.000089.
110. Y. Li, Y. Xu, M. Jiang, *et al.*, “Self-learning perfect optical chirality via a deep neural network”, *Physical Review Letters*, vol. 123, no. 21, 2019, Art. no. 213902. doi: 10.1103/PhysRevLett.123.213902.
111. A. Sakurai, K. Yada, T. Simomura, *et al.*, “Ultrannarrow-band wavelength-selective thermal emission with aperiodic multilayered metamaterials designed by bayesian optimization”, *ACS Central Science*, vol. 5, pp. 319–326, 2019. doi: 10.1021/acscentsci.8b00802.
112. A. M. Hammond and R. M. Camacho, “Designing integrated photonic devices using artificial neural networks”, *Optics Express*, vol. 27, no. 21, pp. 29 620–29 638, 2019. doi: 10.1364/OE.27.029620.
113. D. D. El-Mosalmy, M. Hameed, N. F. Areed, and S. Obayya, “Novel neural network based optimization approach for photonic devices”, *Optical and Quantum Electronics*, vol. 46, no. 3, pp. 439–453, 2014. doi: 10.1007/s11082-013-9869-8.
114. D. Gostimirovic and N. Y. Winnie, “An open-source artificial neural network model for polarization-insensitive silicon-on-insulator subwavelength grating

- couplers”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 25, no. 3, pp. 1–5, 2018. doi: 10.1109/JSTQE.2018.2885486.
115. A. M. Gabr, C. Featherston, C. Zhang, C. Bonfil, Q.-J. Zhang, and T. J. Smy, “Design and optimization of optical passive elements using artificial neural networks”, *JOSA B*, vol. 36, no. 4, pp. 999–1007, 2019. doi: 10.1364/JOSAB.36.000999.

## 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 матеріалу циліндричних ОК неруйнівним вихрострумовим методом вимірювань дозволяє відслідковувати структурні особливості матеріалу виробів, що є дуже важливим при контролі проведення багатьох технологічних операцій щодо зміцнення їх поверхні, спостереження модифікації стану в процесі експлуатації, дослідження хімічного та фазового складу тощо [1], [2].

Суть вимірювання приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик полягає в наступному. Після термічної чи термохімічної обробки деталей: азотуванням, гартуванням, цементацією, покриття нітридом титану тощо, змінюються фізико-механічні властивості матеріалу поверхневого матеріалу виробів. Завдяки кореляційним зв'язкам ЕП та МП з фізико-механічними властивостями матеріалу, в свою чергу, за допомогою вихрострумового контролю можна отримати інформацію про такі властивості приповерхневого шару матеріалу як в'язкість, пластичність, твердість, теплоємність, міцність, а крім того, хімічний і фазовий склад [3].

Вважатимемо, що електрофізичні параметри ОК змінюються вздовж радіуса неперервно відповідно до певних законів розподілу  $\sigma = \sigma(r)$ ,  $\mu = \mu(r)$  рис. 2.1.

Бажано отримувати результат вимірювання при одній частоті струму збу-

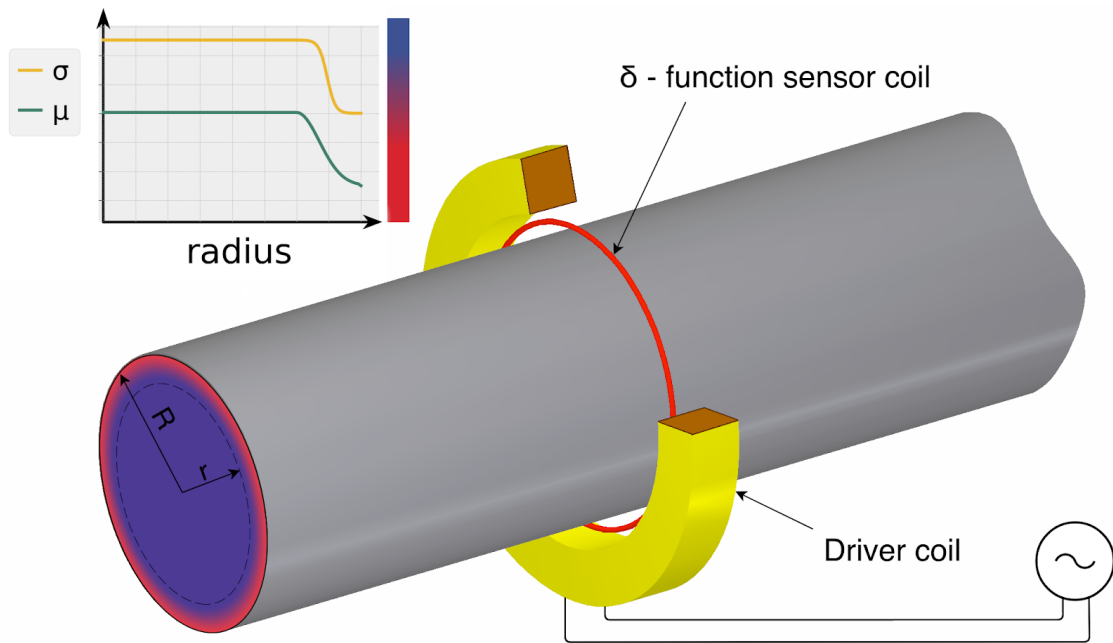


Рис. 2.1. Вихрострумний метод вимірювання параметрів матеріалу приповерхневого шару циліндричних ОК:  $(R - r)$  — приповерхневий шар з змінними електрофізичними параметрами матеріалу; Driver coil — обмотка збудження;  $\delta$ -function sensor coil — вимірювальна обмотка у вигляді нескінченно тонкого витка.

дження та в реальному масштабі часу за одну вимірювальну операцію. Негативними факторами процесу вимірювання є нестабільність частоти струму збудження і вірогідна непостійність радіуса ОК (зазору між датчиком і поверхнею ОК), можливі зміни яких треба враховувати при проведенні вимірювань. З математичної точки зору, визначення параметрів за отриманим сигналом ВСП є некоректно поставленою задачею, розв'язок якої описано в цьому дисертаційному дослідженні. Враховуючи багатопараметровість задачі ідентифікації профілів та з метою скорочення обсягу вимірювальних операцій, накопичення апріорної інформації щодо ОК має сенс виконувати в сурогатній моделі процесу контролю при варіюванні суттєвими технічними параметрами, зокрема ЕП, магнітною проникністю МП приповерхневого шару, діаметром ОК, частотою збудження вихрових струмів [4]. Слід зауважити,

що сурогатна модель створюється заздалегідь перед проведенням вимірювань на основі “точної” електродинамічної моделі, шляхом застосування багатовимірних апроксимаційних технік та характеризується мінімальною обчислювальною ресурсоемністю. Поєднання швидкості обрахунків й їх точності забезпечується використанням методології замісного моделювання, тобто сурогатним моделюванням, як складової загального процесу реконструкції (ідентифікації) приповерхневих профілів матеріалу ОК рис. 2.2. Завдання побудови сурогатної моделі складає один з етапів алгоритму розв’язку задачі, що розглядається.

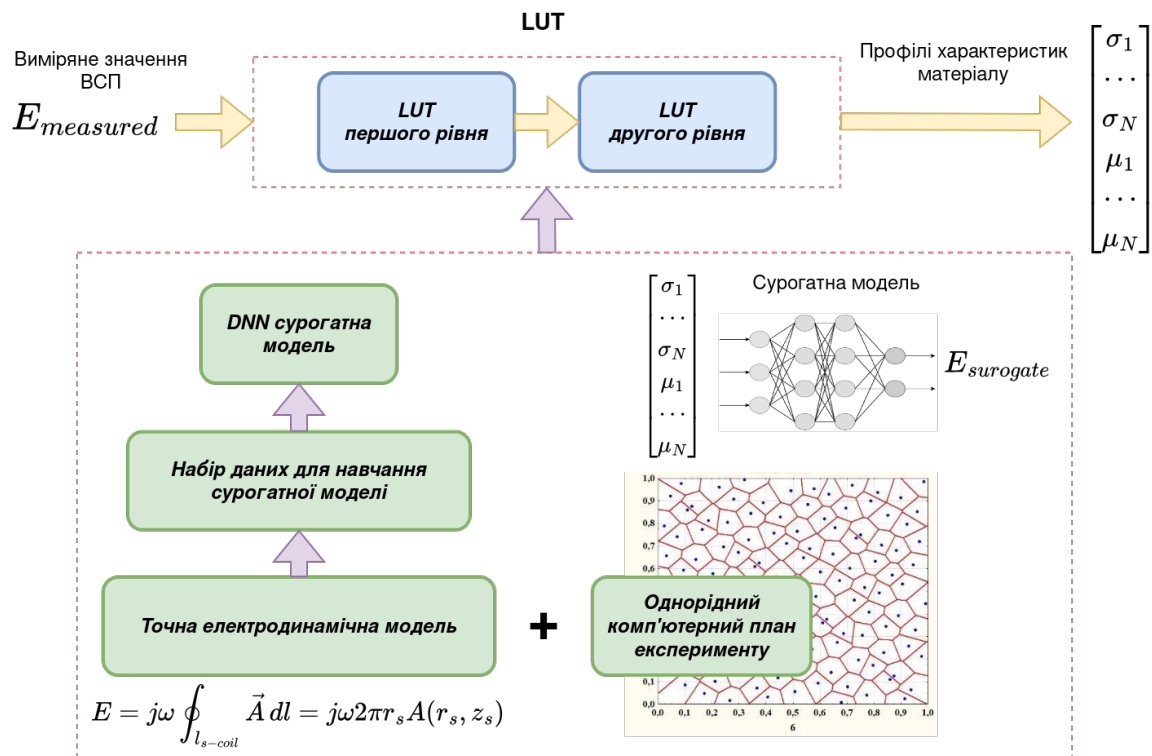


Рис. 2.2. Загальна схема процесу ідентифікації радіальних приповерхневих профілів матеріальних характеристик об’єктів контролю.

Умова застосування методу вимірювання в реальному масштабі часу накладає відповідні додаткові умови на техніці обчислювальних складових методу в сенсі їх швидкості.

Надалі зосередимося на основних етапах реалізації процесу вимірю-



вання вихрострумowego контролю радіальних профілів параметрів матеріалу ОК.

## 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 вихрострумowego контролю циліндричних ОК [5], [6], але внаслідок універсальності має сенс використовувати модель Dodd-Deeds [7]. 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. 2.3.

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

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

$$\vdots$$

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

$$\vdots$$

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

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

Математична модель складалася при прийнятті таких припущень [7]: середовища є лінійними, ізотропними та однорідними; струм збудження  $I$  є си-

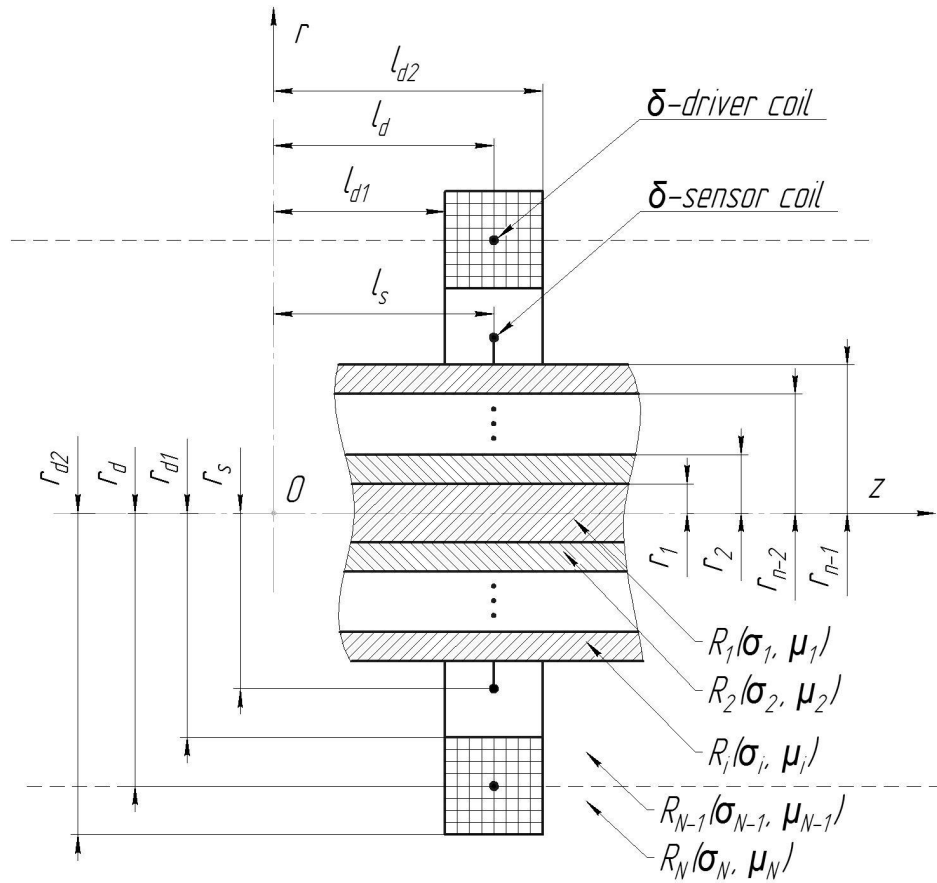


Рис. 2.3. Геометрична модель прохідного ВСП з циліндричним ОК:  $r_{d1}, r_{d2}$  — внутрішній та зовнішній радіуси котушки збудження відповідно;  $r_n$  — зовнішній радіус  $n$ -го шару;  $l_{d1}, l_{d2}$  — відстані до граней котушки збудження,  $r_s$  — радіус вимірювального витка,  $l_s$  — відстань до вимірювального витка.

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:

$$\begin{aligned} A(r, z, r_d, z_d) &= \frac{I\mu_0 r_d}{\pi} \int_0^\infty \frac{Q1 Q2}{U_{22}V_{11} - U_{12}V_{21}} \cos(\alpha(z - z_d)) d\alpha, \\ Q1 &= V_{11}I_1(\alpha_n r) + V_{21}K_1(\alpha_n r), \\ Q2 &= U_{12}I_1(\alpha r_d) + U_{22}K_1(\alpha r_d), \end{aligned} \tag{2.2}$$

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:

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

$$Q1 = \sin(\alpha(z - l_{d1})) - \sin(\alpha(z - l_{d2})), \quad (2.4)$$

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

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

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 апріорним накопиченням інформації

В оглядовому розділі було зроблено висновок, що використання DNN як основи для сурогатної моделі — це універсальний і надійний підхід в контексті апроксимації функцій з заздалегідь невідомою формою поверхні відгуку.

Виходячи з точної аналітичної моделі, створення сурогатної моделі ускладнене тим, що напруга ВСП представлена комплексним числом, тобто характеризується модулем та фазою. Зазвичай нейронні мережі в їх класичному варіанті використання оперують дійсними числами, що вимагає в даному дослідженні дещо інших підходів їх застосування, які відрізняються від за-

гальноприйнятих. Наприклад, використовувати комплекснозначні нейронні мережі CVNNs (Complex-Valued Neural Networks) або комплекснозначні нейронні мережі, що розщеплюються SCVNNs (Splittable Complex-Valued Neural Networks). Слід відзначити, що для регресійних комплекснозначних нейронних мереж входи, виходи, зміщення та синаптичні ваги мають мати комплексні значення. Для комплекснозначних мереж, що розщеплюються, зазвичай використовують дійснозначні мережі окремо для дійсної та уявної частин вхідних сигналів з наступним об'єднанням в комплексний вихід. Використання такого роду нейронних мереж в дослідженнях, що вимагають розрахунки величин, які представляються комплексними числами, є більш природним з математичної точки зору та демонструє кращі результати в порівнянні з дійснозначними нейронними мережами, але є більш складним в реалізації [8].

Архітектура комплекснозначної штучної нейронної мережі SCVNNs, яка використовується в даних дослідженнях, ілюструється на рис. 2.4.

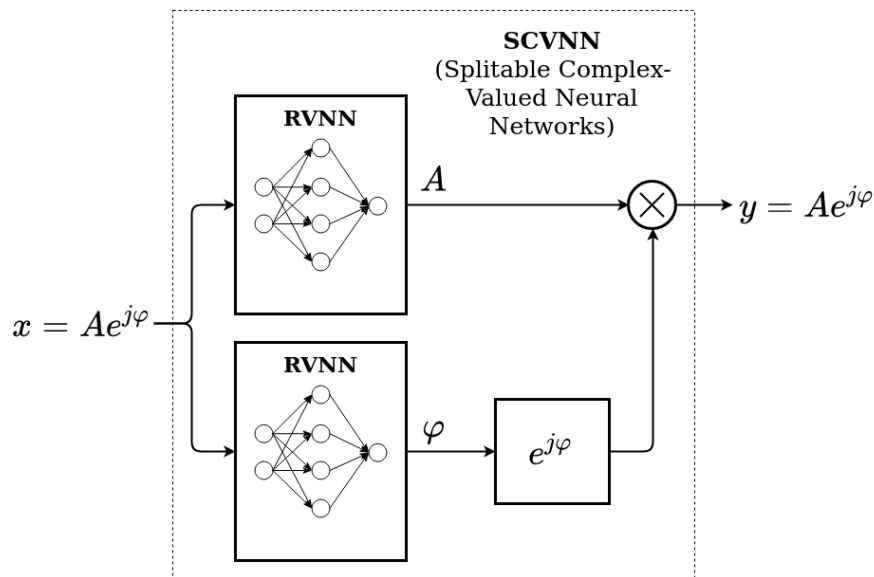


Рис. 2.4. Архітектура комплекснозначної штучної нейронної мережі з розщепленням.

Для реалізації регресійної комплексозначної штучної нейронної мережі застосовувалися дві окремі дійснозначні мережі RVNNs (Real-Valued Neural

Networks) прямого поширення з навчанням методом зворотного розповсюдження помилки (Back Propagation) для визначення оптимальних наборів вагових коефіцієнтів [9].

В більшості випадків двох-трьох прихованих шарів цілком достатньо для адекватної апроксимації будь-якої неперервної нелінійної гіперповерхні відгуку, що доведено теоретично [10]. Вихідний відгук  $k$ -шарової нейромережі, необхідної для нелінійних задач апроксимації, визначається за наступними формулами для вихідних значень нейронів відповідно:

$$a_j^{(1)} = f^{(1)} \left( w_{0,j}^{(1)} + \sum_{i=1}^{N^{(Input\ layer)}} x_i w_{i,j}^{(1)} \right), \quad j = 1, \dots, N^{(1)};$$

$$a_j^{(k)} = f^{(k)} \left( w_{0,j}^{(k)} + \sum_{i=1}^{N^{(k-1)}} a_i^{(k-1)} w_{i,j}^{(k)} \right), \quad j = 1, \dots, N^{(k)};$$

$$k = 1, \dots, Output\ layer;$$

$$y = a^{(Output\ layer)},$$

де  $x$  — вектор вхідних даних;  $w^{(k)}$  — вагові коефіцієнти  $k$ -го прихованого шару;  $w_0^{(k)}$  — зміщення шару нейронів;  $N^{(Input\ layer)}$  — кількість нейронів вхідного шару;  $N^k$  — кількість нейронів прихованого шару;  $f^{(k)}$  — функція активації шару нейронів (вважається, що функція активації для всіх нейронів в шарі однакова);  $a^{(Output\ layer)}$  — вихід останнього шару нейронної мережі з одиничною функцією активації.

В наведених формулах враховується факт того, що кількість нейронів в різних шарах нейромережі не є однаковою.

Попередньо перед процедурою навчання мережі слід проводити нормування початкових даних з метою приведення їх до єдиної “шкали”. При цьому має бути дотриманий наступний підхід до розділення даних для

навчання нейромережевої сурогатної моделі: навчальна частина загальної вибірки даних (Training Set) — це саме та підвибірка, що використовується в процесі навчання; підвибірка для застосування механізму контрольної кросс-валідації (Validation Set) для недопущення ефекту «перенавчання» (Overfitting) і контрольна тестова підвибірка (Control Test Set), що використовується виключно для розрахунку помилки апроксимації, тобто оцінки якості моделі. Одночасне спостереження за зміною в динаміці помилки навчання та помилки валідації на тестових даних дозволяє не тільки фіксувати факт «перенавчання», але й вчасно зупиняти процес підгонки (Early Stopping), забезпечуючи здатність мережі узагальнювати результат на нові вибіркові дані. Для навчання нейромереж доцільно застосовувати сучасні стохастичні оптимізаційні методи градієнтного спуску із накопиченням імпульсу: Adam (Adaptive Moment Estimation), Нестерова (Nesterov accelerated gradient), Adagrad (Adaptive Gradient). Вибір найкращих мереж із множини їх варіантів варто здійснювати за результатами перевірки на контрольній частині вибірки. В результаті така стратегія дозволяє мінімізувати не помилку навчання, а досягти мінімізації помилки узагальнення, що значно важливіше.

Адекватність побудованих нейромереж зручно контролювати певною сукупністю об'єктивних показників [10], серед яких першочергово слід відзначити продуктивність, що обчислюється за наступною формулою:

$$ex = \frac{100}{m} \sum_{i=1}^m \left( 1 - \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \right), \quad (2.6)$$

де  $m$  — кількість зразків даних для перевірки;  $y$  — бажаний вихід мережі;  $\hat{y}$  — вихід мережі при верифікації за створеною сурогатною моделлю. Серед інших показників валідації мереж є поширеними середнє абсолютне значення похибки моделі MAE (Mean Absolute Error), середньоквадратична похибка MSE (Mean Square Error), RMSE (Root Mean Square Error), гістограма розподілу залишків, діаграма розсіювання, тощо:



$$\text{MAE} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |y_i - \hat{y}_i|, \quad (2.7)$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (2.8)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\text{MSE}}. \quad (2.9)$$

Використовуючи такий підхід реалізація адекватної сурогатної моделі не є проблемною, не вимагає надто великої кількості даних для навчання і має гарні узагальнюючі властивості та накопичує апіорну інформації щодо процесу вихрострумowego контролю [11].

Варто зазначити, що описаний підхід для створення сурогатних моделей за допомогою DNN, є універсальним до задач такого типу. Тобто при застосуванні його до іншої задачі, достатньо змінити лише структуру нейронної мережі та в рідких випадках цільову функцію.

#### **2.4. Метод створення однорідних планів експериментів на R послідовностях Робертса**

Обчислювальна технологія побудови сурогатних моделей [12]—[15], що включає планування комп'ютерного експерименту, формування репрезентативної вибірки, створення ефективної нейромережевої сурогатної моделі та перевірки її валідності, вже досить повно теоретично опрацьована та добре зарекомендувала себе в багатьох технічних додатках для розв'язку обернених задач.

Формування навчальної вибірки для побудови сурогатної моделі є одним з найважливіших етапів дослідження, оскільки суттєво впливає на подальші його результати. Вибірка має повно охоплювати вибрані діапазони зміни електрофізичних параметрів ОК та бути якомога більш рівномірною, що забезпечує максимальний обсяг інформації щодо топології поверхні відгуку для її

ефективної апроксимації [4]. Тому має сенс використовувати комп'ютерний план експерименту, створений на основі  $R$  послідовностей.

Рекурсивну  $R$  послідовність в  $d$ -вимірному просторі математично можна записати у вигляді:

$$R_d(\phi_d) : t_n = \{N \cdot \alpha\} \quad (2.10)$$

де  $N$  — кількість точок плану  $N = 1, 2, 3, \dots$ ;

$\alpha$  — ірраціональне число  $\alpha = \left(\frac{1}{\phi_d}, \frac{1}{\phi_d^2}, \frac{1}{\phi_d^3}, \dots, \frac{1}{\phi_d^d}\right)$ ;

$\phi_d$  - унікальний позитивний корінь рівняння  $x^{d+1} = x + 1$ .

Для  $d = 1$ ,  $\phi_1 = 1.618033\dots$ ; для  $d = 2$ ,  $\phi_2 = 1.324717\dots$ ; для  $d = 3$ ,  $\phi_3 = 1.220744\dots$ .

В якості оцінки неоднорідності множини векторів, які спостерігаються в одиничному гіперкубі, зазвичай використовуються два типи розбіжності відносно  $L_2$ -норми: центровану розбіжність (the centered discrepancy) та циклічну розбіжність (the wrap-around discrepancy), які є інваріантними щодо перемаркування й упорядкування факторів та відносно обертання координат.

Показники розбіжності для  $N$  точок плану в  $d$ -вимірному просторі обчислюються відповідно до співвідношень [16]:

а) центрована розбіжність (Central discrepancy)

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

б) циклічна розбіжність (Wrap-around discrepancy)

$$(WD(P))^2 = \left(\frac{4}{3}\right)^d + \frac{1}{N^2} \cdot \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N \prod_{i=1}^d \left[\frac{3}{2} - |x_{ki} - x_{ji}| \cdot (1 - |x_{ki} - x_{ji}|)\right].$$

Вважається, що більш низьке значення розбіжності при порівнянні планів експерименту притаманно більш рівномірному, а, відповідно, більш бажаному плану.

Для наочності порівняльного аналізу планів доцільно використовувати графічне представлення згенерованих даних у вигляді діаграм Вороного [17].

Термічна чи термохімічна обробка виробу зачасти призводить до зміни електрофізичних параметрів матеріалу лише в приповерхневій зоні ОК. Тож припускається, що приповерхневий матеріал ОК має неперервну зміну електрофізичних параметрів уздовж його радіусу  $\sigma = \sigma(r)$ ,  $\mu = \mu(r)$ , а глибинний матеріал має сталі параметри. Так як в обраній математичній моделі [7] ЕП та МП в умовних шарах матеріалу ОК є сталими, застосовується апроксимація зміни параметрів матеріалу приповерхневої зони кусково-постійною апроксимацією відповідно до функціональних залежностей їх неперервної зміни.

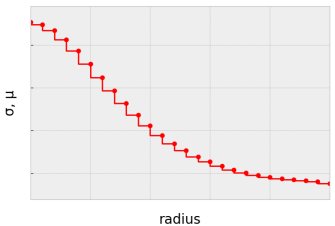
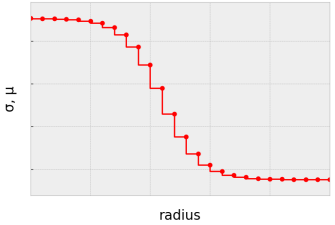
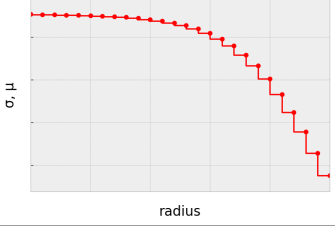
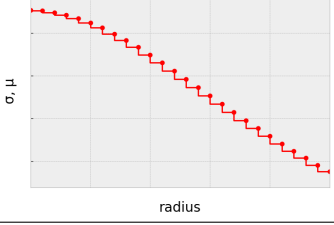
В [18] було запропоновано базові функції апроксимації розподілення параметрів і наведено приклад детальної апроксимації приповерхневої зони товщиною 1мм 50-ма умовними шарами. Для дисертаційного дослідження було обрано чотири типи таких функцій, які подано в табл. 2.1 [5], [18]. На практиці профілі електрофізичних характеристик, які вважатимемо “нормою”, тобто взірцем, що отриманий внаслідок коректної технологічної поверхневої обробки ОК одним із відомих способів, можуть бути визначені експериментально.

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.

План експерименту може в себе включати наступні параметри: усі значення фізичних величин в умовних шарах апроксимації, частоту струму збудження та радіус ОК. Скоротити вимірність планів експерименту можна варіюючи тільки кінцевими значення параметрів приповерхневої зони, а проміжні на-

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	$\sigma(r) = \sigma_1 + (\sigma_2 - \sigma_1)r^{-2}$ $\mu(r) = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1)r^{-2}$	

бори значень формувати за допомогою функції апроксимації. В свою чергу, застосування R послідовностей, при створенні таких планів експерименту, з великою вірогідністю забезпечує рівномірне дослідження поверхні відгуку, що, в свою чергу, дозволяє отримувати завідомо високу однорідність набору даних.

## 2.5. Експрес метод розв'язку оберненої задачі вимірювання

Отже, на останньому етапі передбачається класична однократна процедура вимірювань прохідним ВСП на фіксованій частоті збудження, а саме тій, що використовувалася в процесі моделювання під час створення сурогатної моделі.

Початковою процедурою вимірювань профілів електрофізичних характеристик матеріалу є зняття та збереження значень амплітуди та фази ЕРС вимірювальної котушки трансформаторного прохідного ВСП, тобто значень модуля та аргументу, як вхідної комплекснозначної величини. Подальше віднайдення результату виконується за допомогою таблиць пошуку (Lookup tables, LUT) по амплітуді і фазі сигналу.

В загальному розумінні, ключовою ідеєю такого підходу є абстрагування складної моделі розв'язку оберненої задачі у формі LUT. Ці LUT генеруються симулятором для набору еталонних зразків, що має використовуватися один раз для кожного специфічного ОК. Потім можна використовувати LUT для пошуку швидкого розв'язку задачі без виклику симулятора, досягаючи при цьому результатів, співставлених з точністю симулятора [19]—[22].

Простіше кажучи, таблиця пошуку LUT — це масив, який містить набір попередньо обчислених результатів для вимірів профілів електрофізичних параметрів. Цей масив надає доступ до результатів швидше, ніж обчислення кожного разу результату даної операції. Зазвичай LUT використовуються в системах збору та обробки даних у реальному часі, часто в вбудованих системах (embedded systems), оскільки такі типи систем є вимогливими до часових обмежень. Економія часу обробки може бути значною, тому що отримання значення з пам'яті часто швидше, ніж виконання ресурсозатратного обчислення.

В застосунку до задачі дисертаційного дослідження, розглядається наступна імплементація LUT.

Складовою методу є генерування множини екземплярів-кандидатів ОК, які різняться профілями в загальному випадку в залежності від  $f$ ,  $R$ , ЕП та МП. Такі кандидати на розв'язок мають бути попередньо підготовлені чисельним моделюванням, в конкретному випадку сурогатною моделлю, за значно ширшим та детальним планом експерименту, що відрізняється суттєво більшим обсягом даних. Кандидатів необхідно готувати з урахуванням властивих для конкретного технологічного процесу законів розподілу ЕП та МП в приповерхневому шарі ОК. Також при їх підготовці треба брати до уваги фактично можливий розкид параметрів  $\sigma_1, \mu_{r1}; \sigma_N, \mu_{rN}$  [23]. Підготовлені таким чином кандидати розв'язку і становлять собою таблицю пошуку.

Метод є доволі універсальним внаслідок можливості внесення в перелік впливових факторів при накопиченні апріорної інформації в сурогатній моделі, зокрема додаткових параметрів як тих, що підлягають вимірюванням (наприклад, діаметр циліндричного ОК), так й тих, які сприяють їх ефективному проведенню (варіювання частотою збудження).

## 2.6. Висновки до розділу 2

В цьому розділі в рамках створення експрес-методу запропоновано універсальний підхід до побудови сурогатної моделі, що дозволяє відмовитися від ряду ресурсозатратних експериментів з використанням “точної” ресурсозатратної моделі. Використовуючи глибокі нейронні мережі, реалізація адекватної сурогатної моделі не є проблемною, не вимагає надто великої кількості даних для навчання і має гарні узагальнюючі властивості та спроможна накопичити апріорну інформації щодо процесу вихрострумового контролю.

Така сурогатна модель може бути побудована з урахуванням шкідливих факторів, до яких відноситься нестабільність частоти збудження вихрострумового перетворювача та локальні зміни діаметру об'єкту контролю.

Запропоновано метод створення однорідних комп'ютерних планів експе-

риментів на основі квазі-випадкових  $R$  послідовностей, що дозволяє створити адекватну багатофакторну сурогатну модель зі складною топографією поверхні відгуку та накопиченням апіорної інформації щодо об'єкту контролю.

Запропоновано засоби створення варіантів-кандидатів для розв'язку задачі за допомогою запропонованої сурогатної моделі.

Описано новий багатопараметровий експрес-метод вихрострумowego вимірювання радіальних приповерхневих профілів електрофізичних параметрів циліндричних об'єктів контролю. Математично метод оснований на винятковій здатності швидкого розв'язку рівнянь Максвелла без фактичного явного виконання такого розв'язку завдяки апроксимації глибокими нейронними мережами точної моделі вихрострумowego контролю та використання таблиць пошуку. Метод є універсальним та може бути поширений на багатопараметровий вимірювальний контроль з одночасним додатковим визначенням діаметру циліндричного об'єкта, а також узагальнений на аналогічні вихрострумові вимірювання.

## 2.7. Список використаних джерел до розділу 2

1. N. Ida and N. Meyendorf, *Handbook of Advanced Non-Destructive Evaluation*. Cham: Springer, 2019, p. 1626, isbn: 978-3-319-26552-0.
2. A. L. Dorofeev, *Vihrevye toki[Eddy currents]*, in Russian. Moskva: Jenergija, 1977.
3. A. L. Dorofeev, *Indukcionnaja strukturoskopija[Induction structuroscopy]*, in Russian. Izdatel'stvo "Jenergija", 1973.
4. 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. doi: 10.24027/2306-7039.1.2020.204226.
5. V. Koliskina, “Analytical and quasi-analytical solutions of direct problems in eddy current testing”, Ph.D. dissertation, Riga Technical University, Riga, 2013, p. 193.
  6. 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.
  7. 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.
  8. J. Dramsch, M. Lühje, and A. Christensen, “Complex-valued neural networks for machine learning on non-stationary physical data”, *Computers & Geosciences*, vol. 146, Jan. 2021, issn: 0098-3004. doi: 10.1016/j.cageo.2020.104643.
  9. О. Г. Руденко та Є. В. Бодянський, *Штучні нейронні системи*. Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006.
  10. A. Gulli and S. Pal, *Deep Learning with Keras*. Packt Publishing, 2017, isbn: 9781787128422.
  11. 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. doi: 10.24027/2306-7039.3.2020.216824.
  12. V. Y. Halchenko, R. V. Trembovetska, and V. V. Tychkov, “Development of excitation structure rbf-metamodels of moving concentric eddy current probe”, *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 2, pp. 28–38, 2019. doi: 10.20998/2074-272X.2019.2.05.



13. В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька та В. В. Тичков, “Застосування нейрокомп’ютинга на етапі побудови метамоделей в процесі оптимального сурогатного синтезу антен”, *Вісник НТУУ “КПІ”. Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування*, № 74, с. 60—72, 2018. doi: 10.20535/RADAP.2018.74.60-72.
14. Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко та В. В. Тичков, “Побудова MLP-метамоделі накладного вихрострумового перетворювача для задач сурогатного оптимального синтезу”, *Технічні вісті*, № 1(47), 2(48), с. 27—31, 2018.
15. R. V. Trembovetska, V. Y. Halchenko, and V. V. Tychkov, “Multiparameter hybrid neural network metamodel of eddy current probes with volumetric structure of excitation system”, *International Scientific Journal «Mathematical Modeling»*, vol. 3, no. 4, pp. 113—116, 2019. [Online]. Available: <https://stumejournals.com/journals/mm/2019/4/113>.
16. M. Elsayah, *Constructing Uniform Experimental Designs: In View of Centered and Wrap-around Discrepancy* (Theory of Probability, Stochastics, Mathematical Statistics), 1st. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014, isbn: 365963185X.
17. 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. doi: 10.2478/acss-2020-0009.
18. E. Uzal, “Theory of eddy current inspection of layered metals”, Ph.D. dissertation, 1992.
19. A. Youssef, B. Murmann, and H. Omran, “Analog ic design using pre-computed lookup tables: Challenges and solutions”, *IEEE Access*, vol. PP, pp. 134 640—134 652, Jul. 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3010875.

20. P. Jespers and B. Murmann, *Systematic Design of Analog CMOS Circuits Using Pre-Computed Lookup Tables*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2017. doi: 10.1017/9781108125840.
21. M. Sabry, H. Omran, and M. Dessouky, “Systematic design and optimization of operational transconductance amplifier using gm/id design methodology”, *Microelectronics Journal*, vol. 75, pp. 87–96, May 2018. doi: 10.1016/j.mejo.2018.02.002.
22. M. Sabry, I. Nashaat, and H. Omran, “Automated design and optimization flow for fully-differential switched capacitor amplifiers using recycling folded cascode ota”, *Microelectronics Journal*, vol. 101, Jul. 2020, Art. no. 104814, issn: 1879-2391. doi: 10.1016/j.mejo.2020.104814. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026269219310080>.
23. В. Я. Гальченко, А. 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, issn: 2306-7039. doi: 10.24027/2306-7039.1.2022.258678. url: <https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/4118>.

### 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 використовуються числові методи моделювання, такі як наприклад метод скінченних елементів. В випадку моделі вихрострумового контролю дисертаційного дослідження через специфічну зміну електрофізичних параметрів ОК вздовж його радіусу в приповерхневому шарі на відносно малій ділянці, використання таких інструментів для побудови моделі за допомогою числових методів практично не є реалістичним. Тому доводиться реалізовувати модель на базі аналітичного розв’язку рівнянь Максвелла.

Точна електродинамічна модель процесу вимірювання вихрострумовим перетворювачем електрофізичних параметрів циліндричних об’єктів контролю, яка описана в пункті 2.2 даного дисертаційного дослідження, має ряд непростих математичних функцій та виразів, що потребують специфічних інструментів та прийомів їх обчислення. По своїй суті задача зводиться до обчислення функції з невластими інтегралами та функціями Бесселя першого та другого роду різних порядків та комплексним аргументом.

Проаналізувавши перелік найкращих програмних засобів та застосунків, що можуть бути використані для розв’язку поставленої задачі, як програмне середовище було обрано Python. Цей вибір обумовлений набором готових необхідних математичних функцій, зручність роботи з даними, гнучкість у

розробці, вводі, виводі інформації і візуалізації інформації, великою спільною користувачів, кросплатформністю та відкритим програмним кодом.

Відповідно до “точної” електродинамічної моделі для обчислення векторного потенціалу і напруги ВСП було складено програмне забезпечення, яке реалізовано за допомогою мови програмування Python 3 та з використанням бібліотек NumPy і SciPy. Для оптимізації калькуляцій деякі функції і підінтегральні вирази з функціями Бесселя були замінені апроксимаціями. Інтегрування проводилося методом усічення з адаптивною межею та розбиттям діапазону інтегрування на частини. Також була запозичена логіка обчислення матриць параметрів відношення матеріалу в шарах ОК з [1].

Верифікацію комплексу програм було проведено за допомогою аналітичних моделей для більш простих випадків, тобто двошарових ОК [2], [3], які дозволяють отримати значення векторного потенціалу в області розміщення вимірювального витка, а також за допомогою програмного продукту мультифізичного моделювання COMSOL Multiphysics (AC/DC Module), що використовує для аналогічних розрахунків FEM.

Спрощена тестова модель для двошарового ОК із немагнітного матеріалу [2] має вигляд:

$$\begin{aligned}
 A(r, z) = & \frac{IN_d\mu_0}{\pi} \int_0^\infty \left\{ \frac{K(r_{d2}, r_{d1})}{\alpha^3} \{ I_1(\alpha r) \right. \\
 & - \left[ \frac{K_1(\alpha_2 r_2)}{r_2 D(\alpha) K_1(\alpha r_2)} \times (\alpha_1 I_1(\alpha_2 r_1) I_0(\alpha_1 r_1) \right. \\
 & - \alpha_2 I_1(\alpha_1 r_1) I_0(\alpha_2 r_1)) - \frac{I_1(\alpha_2 r_2)}{r_2 D(\alpha) K_1(\alpha r_2)} \times (\alpha_2 K_0(\alpha_2 r_1) I_1(\alpha_1 r_1) \\
 & - \alpha_2 K_1(\alpha_2 r_1) I_0(\alpha_1 r_1)) + \left. \frac{I_1(\alpha r_2)}{K_1(\alpha r_2)} \right] K_1(\alpha r) \times [\sin(\alpha(z - l_{d1})) \\
 & - \sin(\alpha(z - l_{d2}))] \} \Big\} d\alpha,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D(\alpha) = & [\alpha_2 K_0(\alpha_2 r_2) K_1(\alpha r_2) - \alpha K_0(\alpha r_2) K_1(\alpha_2 r_2)] \times \\
& \times [\alpha_1 I_1(\alpha_2 r_1) I_0(\alpha_1 r_1) - \alpha_2 I_1(\alpha_1 r_1) I_0(\alpha_2 r_1)] + \\
& + [\alpha_2 K_0(\alpha_2 r_1) I_1(\alpha_1 r_1) + \alpha_1 K_1(\alpha_2 r_1) I_0(\alpha_1 r_1)] \times \\
& \times [\alpha I_1(\alpha_2 r_2) K_0(\alpha r_2) + \alpha_2 I_0(\alpha_2 r_2) K_1(\alpha r_2)].
\end{aligned}$$

Другу тестову модель [3] для ОК з магнітного матеріалу подано рівнянням:

$$\begin{aligned}
A(r, z) = & \frac{IN_d \mu_0}{\pi} \int_0^\infty \left\{ \frac{K(r_{d2}, r_{d1})}{\alpha^3} \{I_1(\alpha r) + S(\alpha) K_1(\alpha r)\} \times \right. \\
& \times [\sin(\alpha(z - l_{d1})) - \sin(\alpha(z - l_{d2}))]\} d\alpha,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D(\alpha) = & [\alpha K'_1(\alpha r_2) K_1(\alpha_2 r_2) - \beta_2 K'_1(\alpha_2 r_2) K_1(\alpha r_2)] \times \\
& \times [\beta_1 I_1(\alpha_2 r_1) I'_1(\alpha_1 r_1) - \beta_2 I_1(\alpha_1 r_1) I'_1(\alpha_2 r_1)] + \\
& + [\beta_1 K_1(\alpha_2 r_1) I'_1(\alpha_1 r_1) - \beta_2 K'_1(\alpha_2 r_1) I_1(\alpha_1 r_1)] \times \\
& \times [\beta_2 I'_1(\alpha_2 r_2) K_1(\alpha r_2) - \alpha I_1(\alpha_2 r_2) K'_1(\alpha r_2)],
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S(\alpha) = & \frac{1}{r_2 D(\alpha) K_1(\alpha r_2)} \{K_1(\alpha_2 r_2) [\beta_2 I_1(\alpha_1 r_1) I'_1(\alpha_2 r_1) - \\
& - \beta_1 I_1(\alpha_2 r_1) I'_1(\alpha_1 r_1)] + I_1(\alpha_2 r_2) [\beta_1 K_1(\alpha_2 r_1) I'_1(\alpha_1 r_1) - \\
& - \beta_2 K'_1(\alpha_2 r_1) I_1(\alpha_1 r_1)] - r_2 D(\alpha) I_1(\alpha r_2)\}.
\end{aligned}$$

Для верифікації з допомогою пакету COMSOL Multiphysics використовувалася модель, побудована в осесиметричній системі координат. ЕП повітря регіону моделі при розрахунках дорівнювала 1 См/м, оскільки це значно зменшує час розрахунку МСЕ, але суттєво не спотворює числовий результат. Геометричні розміри цього регіону (Air box) штучно обмежувалися та становили: радіус  $r_{ab} = 80$  мм; відстані до обмежувальних границь  $l_{ab1} = 0$  мм,  $l_{ab2} = 100$  мм відповідно. Котушка збудження вважалася однорідною й багатовитковою (Homogenized multi-turn coil). Вимірювальна котушка розгляда-

лась як функція Дірака. Загальний вигляд геометричної моделі показано на рис. 3.1.

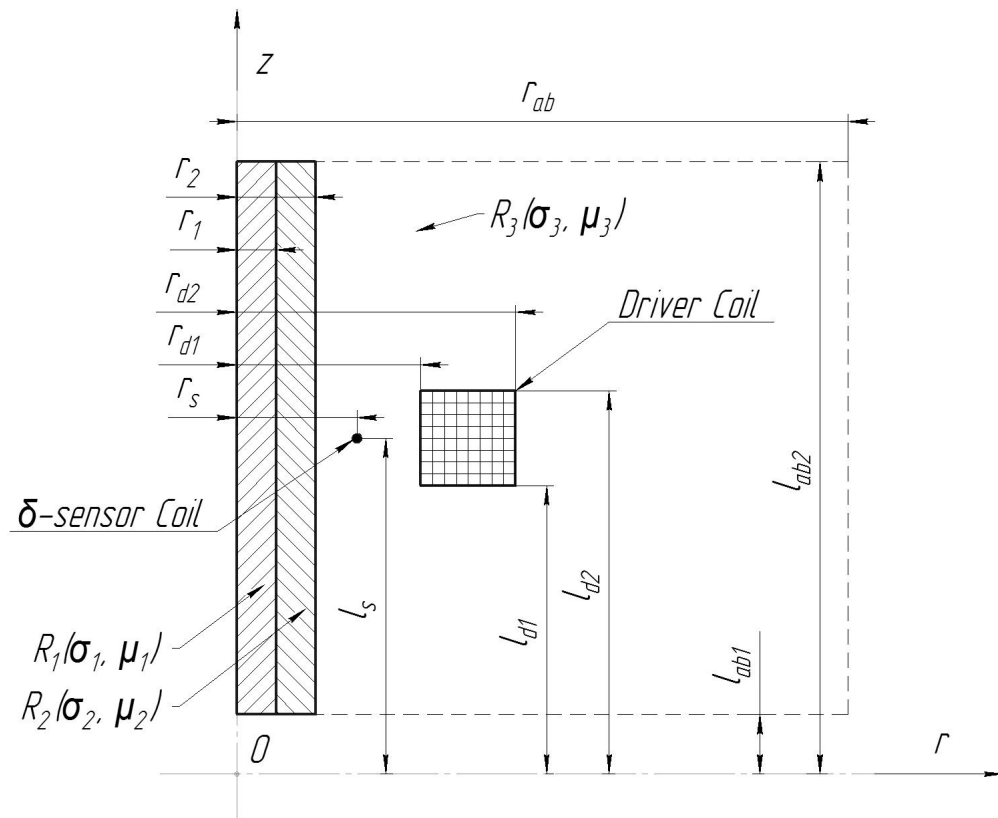


Рис. 3.1. Геометрична модель ВСП для моделювання в пакеті COMSOL Multiphysics.

В табл. 3.1 наведено вихідні дані для розрахунків з використанням моделей немагнітного ОК, де  $\mu_r$  — відносна МП  $n$ -го шару ОК.

Таблиця 3.1

### Вихідні дані для моделей немагнітного ОК

$r_{d1}$ , мм	$r_{d2}$ , мм	$l_{d1}$ , мм	$l_{d2}$ , мм	$r_s$ , мм	$l_s$ , мм	$r_1$ , мм	$r_2$ , мм	$\sigma_1$ , См/м	$\sigma_2$ , См/м	$\mu_{r1}$	$\mu_{r2}$	$W$	$I$ , А
16	19	47,5	52,5	13,5	50	9	10	$3,766 \cdot 10^7$	$1,88 \cdot 10^7$	1	1	100	1

Результати обчислення векторного потенціалу для чотирьох випадків використання вищевказаних моделей наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

**Результати обчислень дійсної та уявної частин векторного потенціалу  
для немагнітного ОК**

Частота, Гц	Векторний потенціал, Вб/м							
	модель [2]		модель [3]		модель [1], [4]		модель MSE	
	Re A $\cdot 10^{-5}$	Im A $\cdot 10^{-6}$	Re A $\cdot 10^{-5}$	Im A $\cdot 10^{-6}$	Re A $\cdot 10^{-5}$	Im A $\cdot 10^{-6}$	Re A $\cdot 10^{-5}$	Im A $\cdot 10^{-6}$
100	2,89007	-2,41258	2,89007	-2,41258	2,89007	-2,41258	2,86060	-2,34160
200	2,72492	-3,48933	2,72492	-3,48933	2,72492	-3,48933	2,70060	-3,40250
300	2,59301	-3,69192	2,59301	-3,69192	2,59301	-3,69192	2,57190	-3,61150
...	...	...	...	...	...	...	...	...
2400	2,16979	-2,28339	2,16979	-2,28339	2,16979	-2,28339	2,15530	-2,25060
2500	2,16370	-2,25452	2,16370	-2,25452	2,16370	-2,25452	2,14930	-2,22240
2600	2,15794	-2,22722	2,15794	-2,22722	2,15794	-2,22722	2,14360	-2,19570
...	...	...	...	...	...	...	...	...
4800	2,07383	-1,82864	2,07383	-1,82864	2,07383	-1,82864	2,06060	-1,80640
4900	2,07157	-1,81796	2,07157	-1,81796	2,07157	-1,81796	2,05830	-1,79590
5000	2,06936	-1,80756	2,06936	-1,80756	2,06936	-1,80756	2,05610	-1,78580

Результати обчислень свідчать про досить високу точність розрахунків, при яких максимальна відносна похибка для дійсної та уявної частин векторного потенціалу не перевищує 3% (1,7% в області частот вище 1 кГц), що дозволяє вважати модель, яка підлягає верифікації, адекватною.

Вихідні дані для верифікації моделі слабомагнітного ОК наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

**Вихідні дані для моделей слабомагнітного ОК**

$r_{d1}$ , мм	$r_{d2}$ , мм	$l_{d1}$ , мм	$l_{d2}$ , мм	$r_s$ , мм	$l_s$ , мм	$r_1$ , мм	$r_2$ , мм	$\sigma_1$ , См/м	$\sigma_2$ , См/м	$\mu_{r1}$	$\mu_{r2}$	$W$	$I$ , А
16	19	47,5	52,5	13,5	50	9	10	6,99 $\cdot 10^6$	3,495 $\cdot 10^6$	25	15	100	1

Порівняльний аналіз результатів обчислення векторного потенціалу на основі моделі [1], [4] та моделі МСЕ можливий з урахуванням даних табл. 3.4.

Таблиця 3.4

**Результати обчислень дійсної та уявної частин векторного потенціалу для слабомагнітного ОК**

Частота, Гц	Векторний потенціал, Вб/м			
	модель [1], [4]		модель МСЕ	
	$\text{Re } A \cdot 10^{-5}$	$\text{Im } A \cdot 10^{-5}$	$\text{Re } A \cdot 10^{-5}$	$\text{Im } A \cdot 10^{-5}$
100	8,36504	-2,77174	7,89160	-1,94760
200	7,05051	-2,50664	6,83770	-2,00940
300	6,40149	-2,33445	6,26320	-1,97350
...	...	...	...	...
2400	3,92757	-1,38956	3,88870	-1,33390
2500	3,89292	-1,37199	3,85430	-1,31850
2600	3,86010	-1,35520	3,82160	-1,30370
...	...	...	...	...
4800	3,40407	-1,10740	3,36550	-1,07590
4900	3,39051	-1,09961	3,35200	-1,06850
5000	3,37732	-1,09202	3,33880	-1,06120

Максимальна похибка обчислень з використанням моделі [1], [4] є дещо більшою, ніж для попереднього випадку немагнітного ОК, та становить 7,6% в області частот вище 1 кГц, але і в цьому випадку точність результатів можна вважати прийнятною для розрахунків з магнітним ОК. Графік розбіжностей чисельних значень дійсної та уявної частин векторного потенціалу (табл. 3.4) в залежності від частоти збудження для наочності показано на рис. 3.2 та 3.3.

Аналіз даних, наведених на цих рисунках, свідчить щодо більшої похибки в області частот, нижчих за 1 кГц, які практично не використовуються при вихрострумових вимірюваннях.

Верифікацію обчислень напруги ВСП не має сенсу проводити, так як вона напряму залежить від точності розрахунку векторного потенціалу відповідно



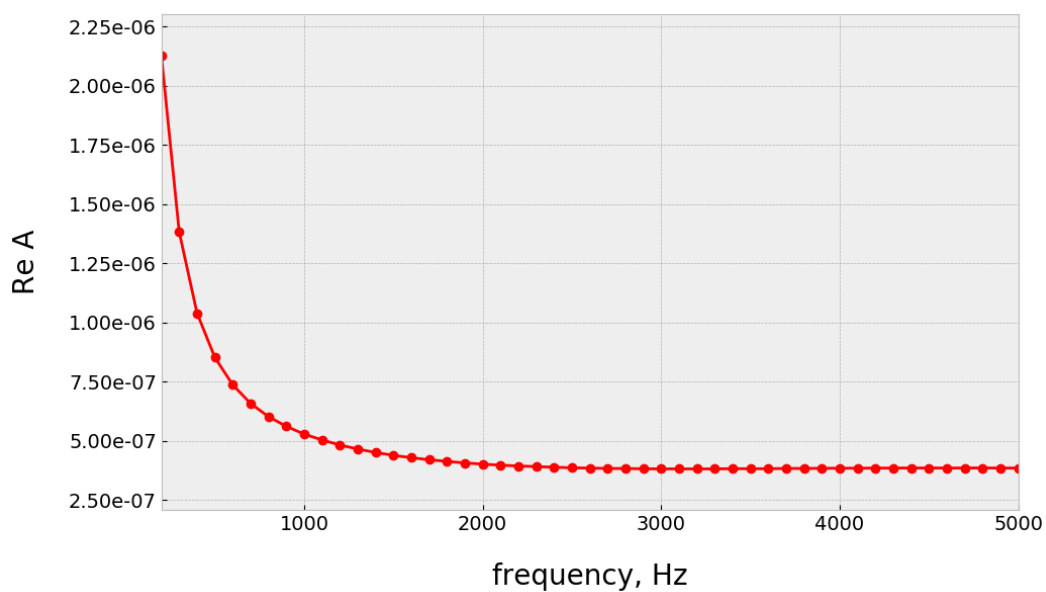


Рис. 3.2. Абсолютна похибка розрахунку значень дійсної складової векторного потенціалу для слабوماгнітного ОК.

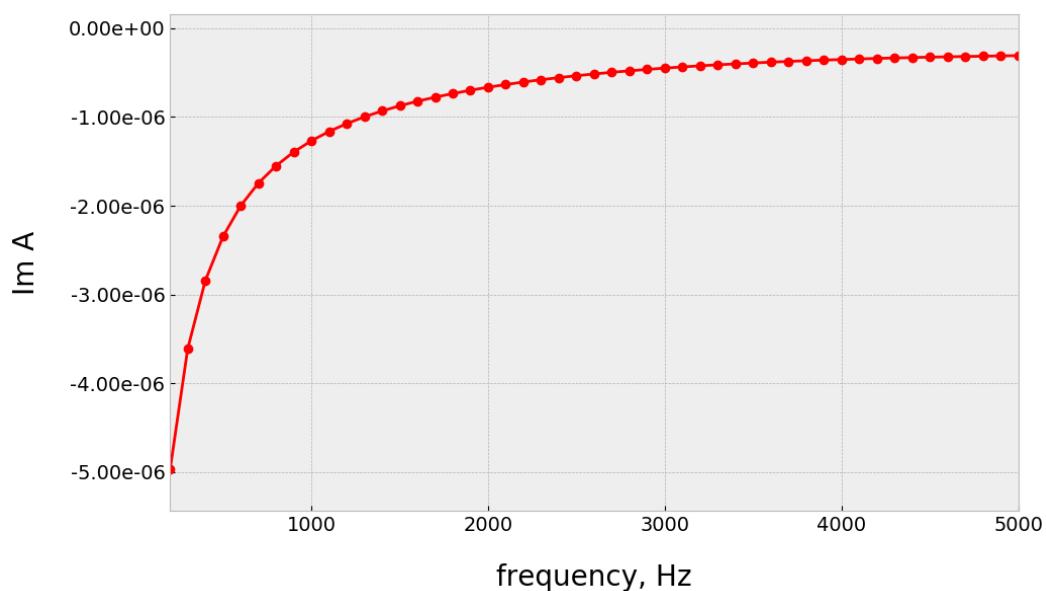


Рис. 3.3. Абсолютна похибка розрахунку значень уявної складової векторного потенціалу для слабوماгнітного ОК.

до формули 2.4.

Таким чином, запропоновану математичну модель та створений комплекс програм її реалізації можна вважати придатними для подальших чисельних експериментів, а можливість варіювати електрофізичними параметрами умовних шарів і їх товщиною дозволяє з легкістю апроксимувати розподілення параметрів вздовж радіусу ОК.

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

Для формування коректного плану експерименту спочатку варто визначитися з конкретними параметрами, які будуть змінюватися при розрахунках за цими планами. Так як вважається, що приповерхневий матеріал ОК має неперервну зміну електрофізичних параметрів уздовж його радіусу  $\sigma = \sigma(r)$  та  $\mu = \mu(r)$  саме в зоні приповерхневого шару (рис. 3.4), запропоновано наступний концепт побудови вибірки: електрофізичні характеристики глибинного матеріалу ОК були сталими і задавалися як характеристики 1-го умовного шару, а приповерхневий матеріал був представлений сукупністю 50-ти апроксимаційних шарів з 2-го по 51-й. Отже, зміна їхніх характеристик відбувалася відповідно до певної апроксимізаційної функції. Вибір розбиття приповерхневої зони на 50 шарів є умовним, що показує доволі точну апроксимацію, а збільшення цього числа не призводить до якогось видимої зміни результатів обчислення. При цьому більш детальне дроблення приповерхневої зони для апроксимації зміни параметрів матеріалу негативно впливає на швидкість обчислення результату “точною” моделлю та збільшує розмірність входів сурогатної моделі, що є не бажаним [5].

На рис. 3.5 зображено приклад варіацій значень електричної провідності матеріалу приповерхневого шару ОК, отриманих при апроксимації з використанням функції гіперболічного тангенса.

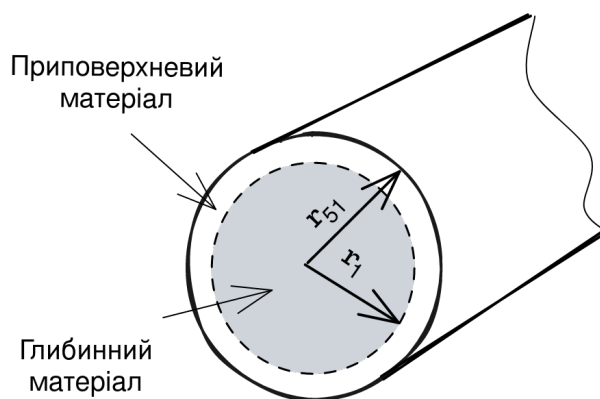


Рис. 3.4. Представлення приповерхневого та глибинного матеріалу циліндричного ОК.

Аналогічним чином, як показано у прикладі вище з ЕП, задавалися значення МП матеріалу ОК. За цим підходом набір значень МП і ЕП, тобто  $\vec{\sigma} = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{51}]$  та  $\vec{\mu} = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{51}]$  розглядається, як набір вхідних даних моделі  $U = F(\vec{\sigma}, \vec{\mu}, f, r, \dots)$ . Опорними змінними, що можуть визначатися за набором значень послідовностей розподілення, є тільки крайні значення  $\sigma_1, \sigma_{51}$  і  $\mu_1, \mu_{51}$ , а всі проміжні значення визначаються за функціями розподілення, що описані в розділі 2.4.

Для того, щоб коректно спланувати наступні числові експерименти з розрізнення профілів електрофізичних параметрів ОК, також варто визначитися з вибором частоти струму збудження. З цією метою для наведеного прикладу було проведено ряд числових експериментів з порівняльним аналізом, які дозволяють визначитися з оптимальною частотою.

В табл. 3.5 наведено вихідні дані для розрахунків з використанням моделей немагнітного ОК, де  $\mu_r$  — відносна МП  $n$ -го шару ОК.

На рис. 3.6 зображено графіки зміни напруги, індукованої у вимірювальному витку, в залежності від зміни профілів ЕП. Інші базові вхідні дані для моделювання бралися з табл. 3.5.

На рис. 3.7 зображено залежності зміни напруги, індукованої у вимірювальному витку, від зміни профілів розподілу МП ОК. Відносна МП першого

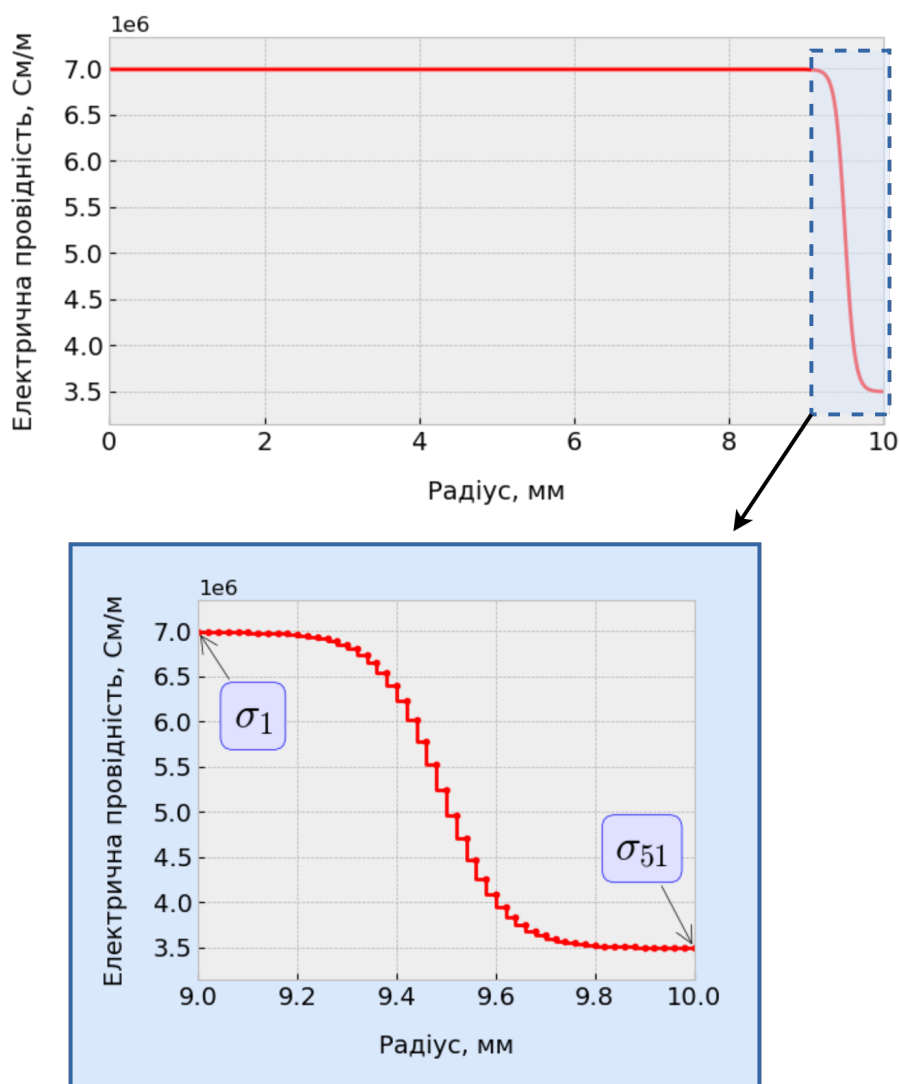


Рис. 3.5. Приклад апроксимації неперервної зміни електрофізичних параметрів приповерхневого матеріалу ОК.

шару ОК була сталою, а для шарів з 2-го по 51-й включно – задавалася відповідно до однієї з функцій апроксимації профілю розподілу в діапазоні від 25 до 15. Інші базові входні дані для моделювання бралися з табл. 3.6.

На рис. 3.8 зображено характер зміни напруги, індукованої у вимірювальному витку, від зміни профілів розподілу провідності та магнітної проникності ОК одночасно. ЕП та відносна МП першого шару ОК були сталими, а для шарів з 2-го по 51-й включно задавалися відповідно до однієї з функцій апроксимації профілів розподілу. ЕП змінювалася в діапазоні від  $6,99 \cdot 10^6$  до

Таблиця 3.5

**Вихідні дані для моделі немагнітного ОК**

$r_{d1}$ , мм	$r_{d2}$ , мм	$l_{d1}$ , мм	$l_{d2}$ , мм	$r_s$ , мм	$l_s$ , мм	$r_1$ , мм	$r_2$ , мм	$\sigma_1$ , См/м	$\sigma_2$ , См/м	$\mu_{r1}$	$\mu_{r2}$	$W$	$I$ , А
16	19	47,5	52,5	13,5	50	9	10	3,766 $\cdot 10^7$	1,88 $\cdot 10^7$	1	1	100	1

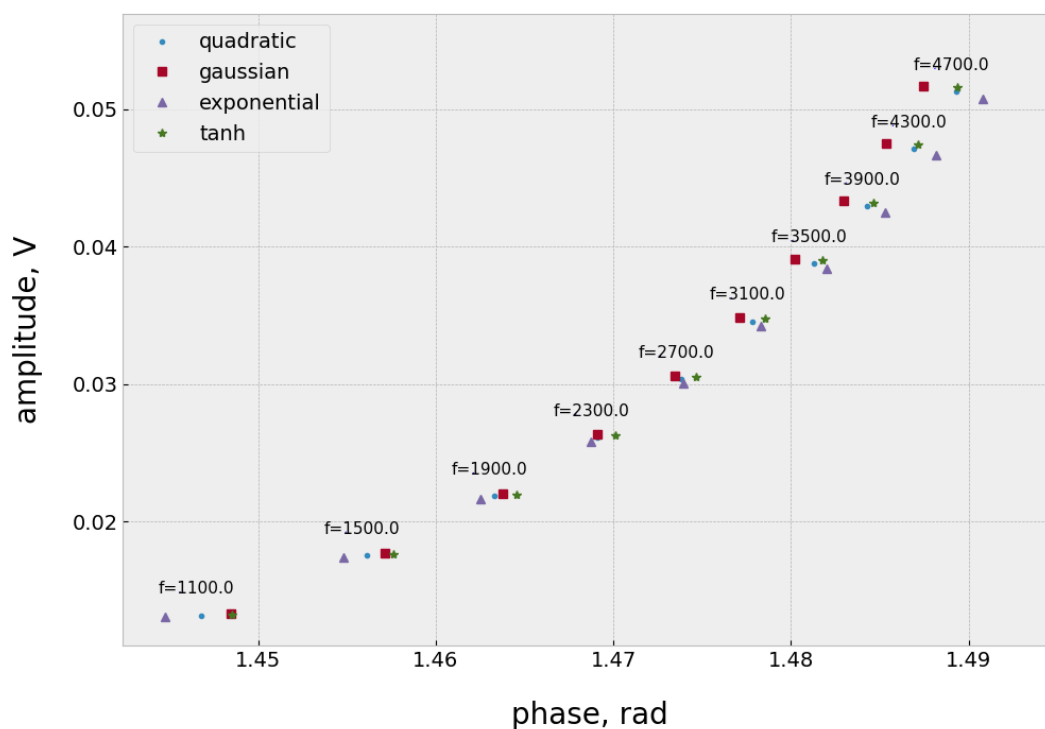


Рис. 3.6. Індукована напруга при різних профілях розподілу провідності для немагнітного ОК.

$3,495 \cdot 10^6$  См/м, а відносна МП — від 25 до 15. Інші базові вхідні дані для моделювання бралися з табл. 3.6.

Аналіз результатів чисельних експериментів показав можливість вибору частоти збудження ВСП, на якій найкраще проявляється розрізнення профілів розподілу електрофізичних параметрів матеріалу циліндричних виробів. А також було обрано частоту 2,5 кГц як оптимальну, бо саме на цій частоті спостерігається найбільша різниця амплітуди та фази сигналу при всіх вищеперелічених числових експериментах.

Таблиця 3.6

## Вихідні дані для моделей слабмагнітного ОК

$r_{d1}$ , мм	$r_{d2}$ , мм	$l_{d1}$ , мм	$l_{d2}$ , мм	$r_s$ , мм	$l_s$ , мм	$r_1$ , мм	$r_2$ , мм	$\sigma_1$ , См/м	$\sigma_2$ , См/м	$\mu_{r1}$	$\mu_{r2}$	$W$	$I$ , А
16	19	47,5	52,5	13,5	50	9	10	6,99 $\cdot 10^6$	3,495 $\cdot 10^6$	25	15	100	1

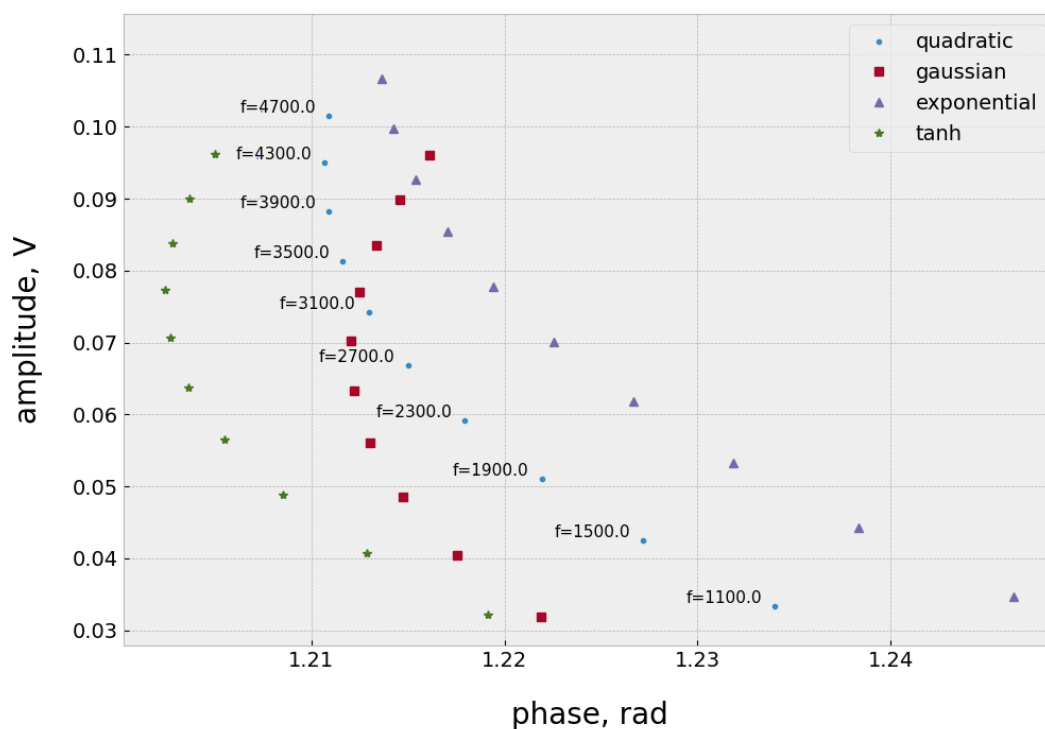


Рис. 3.7. Індукована напруга при різних профілях розподілу магнітної проникності для слабмагнітного ОК.

Як зазначено в розділі 2.4, для створення однорідної вибірки доцільно використовувати R послідовності Робертса. Вони мають низьку розбіжність при малій вибірці та різній розмірності простору. При цьому не вимагають скрупульозного підбору вимірів для підтримки низької розбіжності при багатофакторності планів.

В даному дисертаційному дослідженні для формування комп'ютерного плану експерименту з накопиченням різної апріорної інформації можна виділити такі варіативні параметри: опорні значення ЕП  $\sigma_{51}$  та МП  $\mu_{51}$ , частота

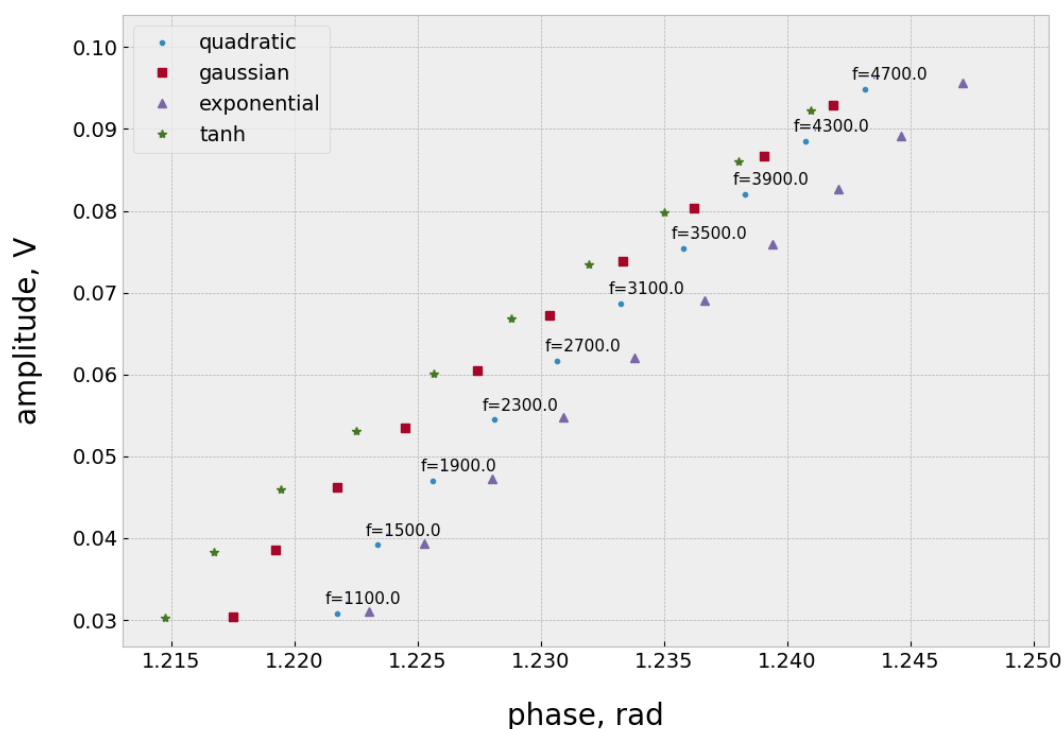


Рис. 3.8. Індукована напруга при різних профілях розподілу провідності та магнітної проникності для слабomagнітного ОК.

струму збудження  $f$ , та радіус ОК. Основні комбінації яких мають вигляд:

$$1) U = F(\sigma_{51}, \mu_{51});$$

$$2) U = F(\sigma_{51}, \mu_{51}, f);$$

$$3) U = F(\sigma_{51}, \mu_{51}, f, r).$$

Усічені приклади таких наборів в одиничному гіперкубі представлено в таблицях 3.7, 3.8, де  $d_1, d_2 \dots d_n$  — номер виміру в просторі.

Таблиця 3.7

**Приклад двофакторного плану експерименту на  $R$  послідовностях в одиничному квадраті**

№	$d_1$	$d_2$
1	0,2549	0,0698
2	0,0098	0,6397

### Продовження таблиці 3.7

№	$d_1$	$d_2$
3	0,7646	0,2095
4	0,5195	0,7794
5	0,2744	0,3492
...	...	...
2498	0,1844	0,961
2499	0,9392	0,5308
2500	0,6941	0,1006
2501	0,449	0,6705
2502	0,2039	0,2403
...	...	...
4996	0,8687	0,4219
4997	0,6236	0,9918
4998	0,3785	0,5616
4999	0,1333	0,1315
5000	0,8882	0,7013

Таблиця 3.8

### Приклад трьохфакторного плану експерименту на R послідовностях в одиничному кубі

№	$d_1$	$d_2$	$d_3$
1	0,3192	0,171	0,0497
2	0,1383	0,8421	0,5994
3	0,9575	0,5131	0,1491
4	0,7767	0,1842	0,6988
5	0,5959	0,8552	0,2485
...	...	...	...
2498	0,7929	0,7669	0,6518
2499	0,6121	0,438	0,2015
2500	0,4313	0,109	0,7512



### Продовження таблиці 3.8

№	$d_1$	$d_2$	$d_3$
2501	0,2505	0,7801	0,3009
2502	0,0696	0,4511	0,8506
...	...	...	...
4996	0,0859	0,0339	0,8036
4997	0,905	0,7049	0,3533
4998	0,7242	0,3759	0,903
4999	0,5434	0,047	0,4527
5000	0,3626	0,718	0,0024

Таблиця 3.9

### Приклад чотирьохфакторного плану експерименту на R послідовностях в одиничному гіперкубі

№	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$
1	0,3567	0,2339	0,1287	0,0386
2	0,2133	0,9678	0,7574	0,5772
3	0,07	0,7017	0,3861	0,1158
4	0,9267	0,4356	0,0148	0,6544
5	0,7834	0,1695	0,6435	0,193
...	...	...	...	...
2498	0,4739	0,7619	0,0094	0,9159
2499	0,3305	0,4957	0,6381	0,4545
2500	0,1872	0,2296	0,2668	0,9931
2501	0,0439	0,9635	0,8955	0,5317
2502	0,9006	0,6974	0,5242	0,0703
...	...	...	...	...
4996	0,4477	0,0237	0,5188	0,3319
4997	0,3044	0,7576	0,1475	0,8705
4998	0,1611	0,4915	0,7762	0,4091
4999	0,0177	0,2254	0,4049	0,9477

### Продовження таблиці 3.9

№	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$
5000	0,8744	0,9593	0,0336	0,4863

Основними якісними характеристиками однорідності послідовностей є центрована розбіжність  $(CD(D_n))^2$  та циклічна розбіжність  $(WD(P))^2$ . Числові значення для наборів R послідовностей з різною кількістю вимірів простору  $d$  та кількістю значень в вимірі  $n$  наведено в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10

### Характеристики розбіжностей R послідовностей при різному наборі розмірностей

$d$	$n$	$(CD(D_n))^2$	$(WD(P))^2$
2	1000	4,2152E-06	3,5556E+00
2	2500	6,3493E-07	3,5556E+00
2	5000	2,8499E-07	3,5556E+00
3	1000	4,3859E-05	4,7408E+00
3	2500	1,5454E-05	4,7408E+00
3	5000	1,3425E-05	4,7408E+00
4	1000	2,8774E-04	6,3214E+00
4	2500	8,0705E-05	6,3211E+00
4	5000	3,9753E-06	6,3210E+00
5	1000	2,3086E-04	8,4284E+00
5	2500	1,4915E-04	8,4282E+00
5	5000	1,0777E-04	8,4282E+00
6	1000	5,0100E-04	1,1239E+01
6	2500	2,6120E-04	1,1238E+01
6	5000	4,1721E-05	1,1237E+01
7	1000	5,6472E-04	1,4985E+01
7	2500	2,1451E-04	1,4984E+01
7	5000	9,1620E-05	1,4983E+01

### Продовження таблиці 3.10

$d$	$n$	$(CD(D_n))^2$	$(WD(P))^2$
8	1000	9,4584E-04	1,9980E+01
8	2500	2,9802E-04	1,9978E+01
8	5000	1,5428E-04	1,9978E+01
9	1000	1,1893E-03	2,6642E+01
9	2500	3,1416E-04	2,6638E+01
9	5000	1,3303E-04	2,6637E+01
10	1000	2,1625E-03	3,5526E+01
10	2500	7,1506E-04	3,5519E+01
10	5000	2,6856E-04	3,5517E+01

Для прикладу масштабування даних для реальних значень факторів взято базові значення з таблиці 3.11 і виконано розрахунки за допомогою наборів  $R$  послідовностей в одиничному гіперкубі з наведених вище таблиць та прийнятних значень можливих відхилень факторів.

Таблиця 3.11

### 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%
Значення максимального відносного відхилення (DeltaMax)	1048500	1,5	500	0,25
Нижня границя відхилення (BaseValue-DeltaMax)	5941500	8,5	2000	9,75
Верхня границя відхилення (BaseValue+DeltaMax)	8038500	11,5	3000	10,25

Таблиця 3.12

**Приклад масштабованого двофакторного плану експерименту**

№	$\sigma_{51}$ , См/м	$\mu_{r51}$
1	6,4852E+06	8,7095E+00
2	5,9705E+06	1,0419E+01
3	7,5557E+06	9,1286E+00
4	7,0410E+06	1,0838E+01
5	6,5262E+06	9,5476E+00
...	...	...
2498	6,3372E+06	1,1383E+01
2499	7,9224E+06	1,0092E+01
2500	7,4076E+06	8,8019E+00
2501	6,8929E+06	1,0511E+01
2502	6,3781E+06	9,2210E+00
...	...	...
4996	7,7743E+06	9,7658E+00
4997	7,2595E+06	1,1475E+01
4998	6,7448E+06	1,0185E+01
4999	6,2300E+06	8,8944E+00
5000	7,8153E+06	1,0604E+01

Таблиця 3.13

**Приклад масштабованого трьохфакторного плану експерименту**

№	$\sigma_{51}$ , См/м	$\mu_{r51}$	$f$ , Гц
1	6,6203E+06	9,0131E+00	2,0497E+03
2	6,2405E+06	1,1026E+01	2,5994E+03
3	7,9608E+06	1,0039E+01	2,1491E+03
4	7,5810E+06	9,0525E+00	2,6988E+03
5	7,2013E+06	1,1066E+01	2,2485E+03
...	...	...	...
2498	7,6152E+06	1,0801E+01	2,6518E+03

### Продовження таблиці 3.13

№	$\sigma_{51}$ , См/м	$\mu_{r51}$	$f$ , Гц
2499	7,2354E+06	9,8139E+00	2,2015E+03
2500	6,8557E+06	8,8270E+00	2,7512E+03
2501	6,4760E+06	1,0840E+01	2,3009E+03
2502	6,0962E+06	9,8533E+00	2,8506E+03
...	...	...	...
4996	6,1303E+06	8,6016E+00	2,8036E+03
4997	7,8506E+06	1,0615E+01	2,3533E+03
4998	7,4709E+06	9,6278E+00	2,9030E+03
4999	7,0911E+06	8,6409E+00	2,4527E+03
5000	6,7114E+06	1,0654E+01	2,0024E+03

Таблиця 3.14

### 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
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

### Продовження таблиці 3.14

№	$\sigma_{51}$ , См/м	$\mu_{r51}$	$f$ , Гц	$r$ , мм
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

На основі масштабованих даних, з використанням опорних значень МП і ЕП, формуються проміжні значення електрофізичних параметрів в умовних шарах приповерхневого матеріалу за допомогою функціональних апроксимаційних залежностей.

Після цього набори даних є придатними до чисельних експериментів чи створення, з застосуванням “точної” моделі, набору значень навчальної вибірки для сурогатної моделі.

В даному підрозділі наведено процедуру створення однорідних комп’ютерних планів експерименту, на конкретному прикладі показано масштабування даних та підхід до апроксимації електрофізичних характеристик приповерхневого матеріалу. Наведені характеристики розбіжностей ілюструють рівномірність та ефективність запропонованих планів експерименту.

### 3.3. Програмні засоби створення сурогатної моделі

Вибір програмного засобу для створення сурогатної моделі на основі DNN не тільки залежить від конкретної задачі, особливостей даних та вимог до швидкості обрахунку та точності моделі, а й від затрат часу на прототипування та зручності використання цих засобів. Також варто враховувати наявність документації та підтримки спільнотою користувачів і розробників вибраного програмного засобу, оскільки це може значно полегшити розробку та підтримку засобів реалізації моделі у майбутньому.

Створення сурогатної моделі виконувалося в середовищі програмування

Python 3 з використанням відкритої бібліотеки Keras (Tensorflow backend). При числових експериментах мережі з найкращою продуктивністю було отримано при навчанні оптимізаційним методом Adam. Це є метод стохастичного градієнтного спуску, який базується на адаптивній оцінці моментів першого та другого порядку. Цей метод є ефективним в обчислювальному відношенні та потребує незначних ресурсів пам'яті [6].

Приклад вхідних даних для створення сурогатної моделі, отриманих за методикою, що викладено у розділі 3.2, наведено у табл. 3.6.

Індукована напруга  $\hat{y} = \dot{U}$  в вимірювальному витку прохідного ВСП була обрахована при сталій частоті струму збудження 2,5 кГц.

При будові сурогатної моделі є зручним використання напруги представленої комплексним числом в алгебраїчній формі [7].

Вибірка попередньо довільно була розділена на три частини: навчальну (64%), тестову (16%), контрольну (20%).

В результаті створення сурогатної моделі отримано глибокі нейронні мережі відповідно для дійсної та уявної складових вихідного сигналу ВСП із однаковими структурами 102-256(Sigmoid)-128(Sigmoid)-64(Sigmoid)-1. В яких Sigmoid — логістична функція активації нейронів. Варто зазначити, що використання альтернативної функції ReLU, яка вважається оптимальною для такого роду задач, давало схожі результати. ReLU (Rectified Linear Unit) — функція активації, яка реалізує простий пороговий перехід в нулі, тобто повертає значення аргументу, якщо він позитивний, і 0 в іншому випадку. Об'єктивні чисельні показники, що характеризують обидві нейромережі на тестовій вибірці, мають наступні значення продуктивності (ex) для дійсної складової значення напруги 96,05% та для уявної складової 95,94%. MSE нейронних мереж при нормованих значеннях для дійсної та уявної складових відповідно 0,00044784 і 0,00019249.

Також створені моделі перевірялися на адекватність розрахунком коефіцієнту детермінації  $R^2$  (3.1) та обчисленням середньої абсолютної відсоткової

помилки (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) (3.2).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.1)$$

$$\text{MAPE} = \left( \frac{100\%}{n} \right) \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (3.2)$$

де  $y$  — бажаний вихід моделі;  $\hat{y}$  — вихідні значення сурогатної моделі;  $\bar{y}$  — середнє значення спостережуваних даних;  $n$  — кількість зразків даних для перевірки.

Для оцінки адекватності використовувалися такі показники як коефіцієнт детермінації  $R^2$  та MAPE. Так значення коефіцієнту детермінації  $R^2$  становлять 0,999578 та 0,9997864, в свою чергу MAPE дорівнює 0,039814% і 0,026852% для сурогатних моделей дійсної та уявної складових напруги відповідно.

Результати верифікаційних обчислень з використанням створеної сурогатної моделі на даних контрольної вибірки, яка взагалі не використовувалася на етапі побудови сурогатної моделі, наведено в табл. 3.15, табл. 3.16 та табл. 3.17.

Таблиця 3.15

**Вхідні значення параметрів електричної провідності ОК для тестування відтворення вихідного сигналу  $\hat{y} = \dot{U}$  прохідного ВСП на даних контрольної вибірки**

№	$\sigma_1$ , См/м	$\sigma_2$ , См/м	...	$\sigma_{51}$ , См/м
1	6,9900E+06	6,9884E+06	...	3,4950E+06
2	6,9900E+06	6,9885E+06	...	3,6916E+06
3	6,9900E+06	6,9882E+06	...	3,0035E+06
4	6,9900E+06	6,9883E+06	...	3,3312E+06
5	6,9900E+06	6,9884E+06	...	3,5933E+06
...	...	...	...	...



### Продовження таблиці 3.15

№	$\sigma_1$ , СМ/М	$\sigma_2$ , СМ/М	...	$\sigma_{51}$ , СМ/М
996	6,9900E+06	6,9882E+06	...	3,0771E+06
997	6,9900E+06	6,9882E+06	...	3,1426E+06
998	6,9900E+06	6,9885E+06	...	3,6669E+06
999	6,9900E+06	6,9882E+06	...	3,0812E+06
1000	6,9900E+06	6,9884E+06	...	3,4744E+06

Таблиця 3.16

**Вхідні значення параметрів магнітної проникності ОК для тестування відтворення вихідного сигналу  $\hat{y} = \hat{U}$  прохідного ВСП на даних контрольної вибірки**

№	$\mu_{r1}$	$\mu_{r2}$	...	$\mu_{r51}$
1	1,0000E+00	1,0042E+00	...	1,0000E+01
2	1,0000E+00	1,0042E+00	...	1,0188E+01
3	1,0000E+00	1,0040E+00	...	9,7188E+00
4	1,0000E+00	1,0039E+00	...	9,5313E+00
5	1,0000E+00	1,0036E+00	...	8,7813E+00
...	...	...	...	...
996	1,0000E+00	1,0036E+00	...	8,6959E+00
997	1,0000E+00	1,0035E+00	...	8,5084E+00
998	1,0000E+00	1,0042E+00	...	1,0008E+01
999	1,0000E+00	1,0048E+00	...	1,1286E+01
1000	1,0000E+00	1,0046E+00	...	1,0911E+01

Таблиця 3.17

**Результати тестування вихідного сигналу  $\hat{y} = \hat{U}$  прохідного ВСП на даних контрольної вибірки**

№	Тестове значення Re(U) вимірю- вального витка	Відтворене зна- чення Re(U) вимірювального витка	Тестове значення Im(U) вимірю- вального витка	Відтворене зна- чення Im(U) вимірювального витка
1	5,1486E-03	5,1499E-03	4,4372E-02	4,4374E-02
2	5,2425E-03	5,2461E-03	4,4522E-02	4,4533E-02
3	4,9370E-03	4,9376E-03	4,4208E-02	4,4198E-02
4	5,0447E-03	5,0424E-03	4,3874E-02	4,3864E-02
5	5,0703E-03	5,0691E-03	4,2887E-02	4,2871E-02
...	...	...	...	...
996	4,8917E-03	4,8867E-03	4,2948E-02	4,2933E-02
997	4,9011E-03	4,8976E-03	4,2698E-02	4,2701E-02
998	5,2143E-03	5,2167E-03	4,4322E-02	4,4326E-02
999	5,0986E-03	5,0982E-03	4,6014E-02	4,6032E-02
1000	5,2323E-03	5,2348E-03	4,5437E-02	4,5446E-02

Порівняльний аналіз отриманих результатів свідчить щодо досить точної апроксимації нелінійних поверхонь відгуку та відповідну адекватність побудованих дійснозначних сурогатних моделей.

На рис. 3.9 – 3.12 ілюструються діаграми розсіювання та гістограми розподілу абсолютних похибок відповідно для дійсної й уявної складових значень індукованої в вимірювальному витку напруги ВСП, що отримані з використанням створених сурогатних моделей на даних контрольної вибірки.

Наведений наочний графічний матеріал підтверджує достатньо високі апроксимаційні можливості створених сурогатних моделей та доводить їх адекватність.

Таким чином, використовуючи DNN для багатовимірної апроксимації гі-

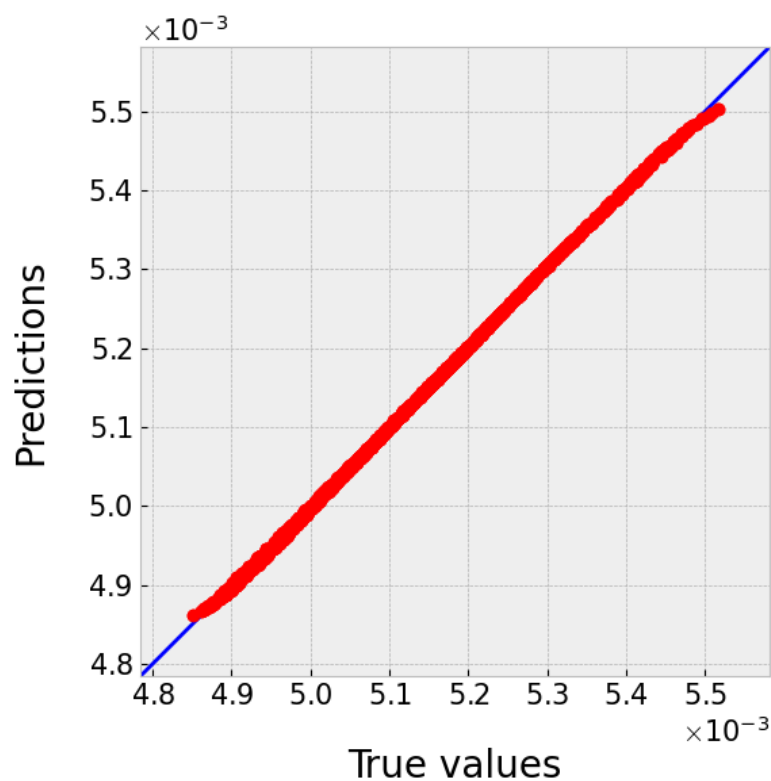


Рис. 3.9. Діаграма розсіювання індукованої  $\text{Re}(U)$  в вимірювальному витку ВСП.

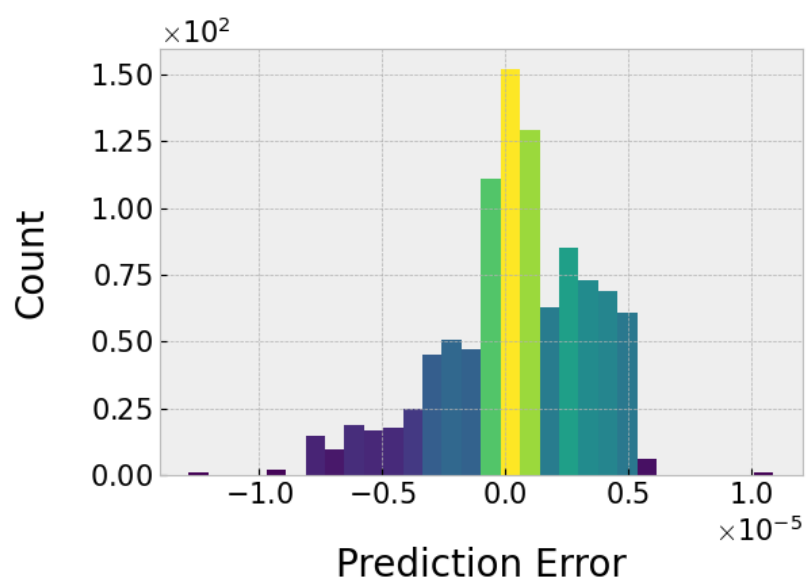


Рис. 3.10. Гістограма розподілу абсолютних похибок індукованої  $\text{Re}(U)$  в вимірювальному витку ВСП.

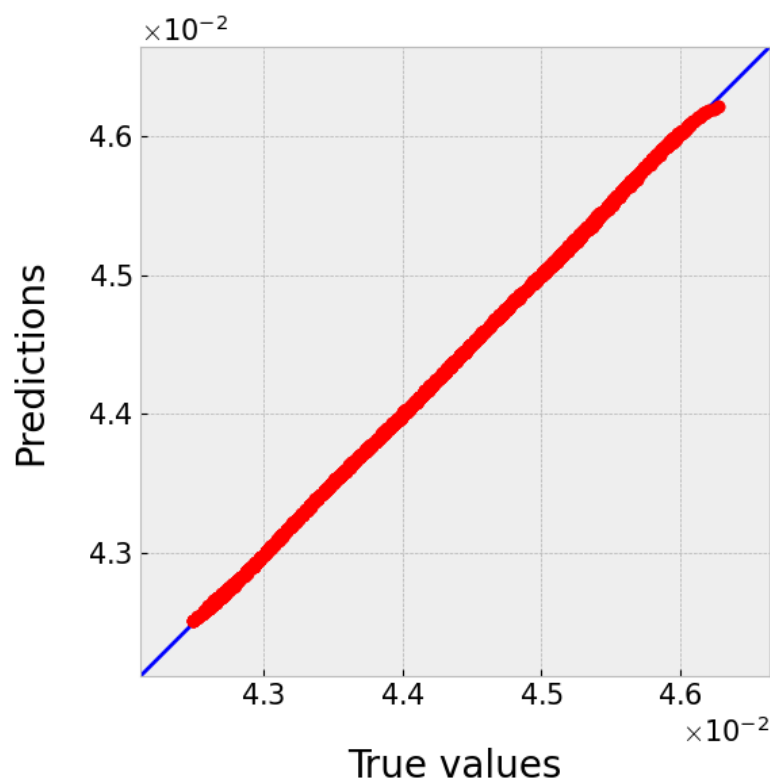


Рис. 3.11. Діаграма розсіювання індукованої  $\text{Im}(U)$  в вимірювальному витку ВСП.

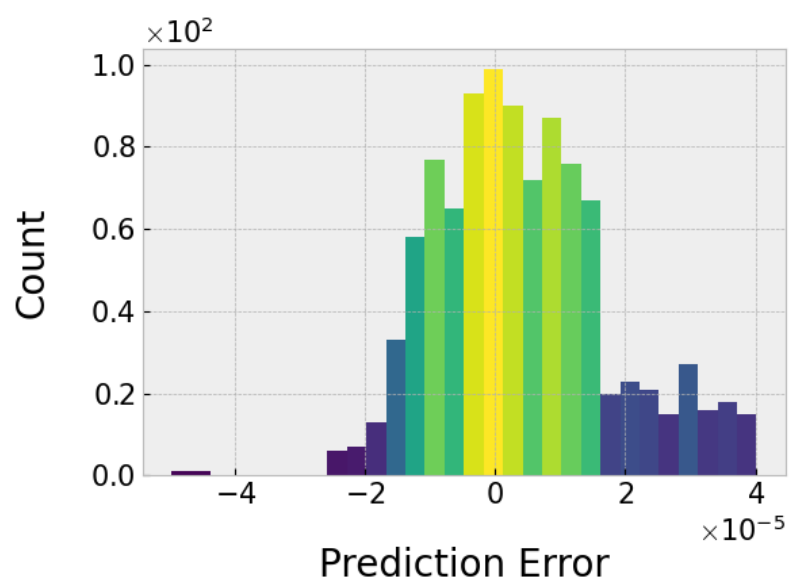


Рис. 3.12. Гістограма розподілу абсолютних похибок індукованої  $\text{Im}(U)$  в вимірювальному витку ВСП.

перповерхні відгуку, побудовано адекватну сурогатну MLP-модель процесу вихрострумового контролю циліндричного слабوماгнітного ОК прохідним перетворювачем. Сурогатна модель виконує функції носія апіорних знань щодо ОК, забезпечує високу обчислювальну ефективність та незначні часові затрати на розрахунки, що дозволяє розв'язувати задачу параметричної ідентифікації радіальних приповерхневих профілів електрофізичних характеристик ОК у реальному часі в процесі виконання вимірювальних операцій.

### **3.4. Розв'язок обернених вимірювальних задач вихрострумової структуроскопії методом Lookup Tables**

Таблиці пошуку LUT є одним з найкращих засобів для відновлення значень параметрів об'єкта вимірювання на основі вимірювань вихідного сигналу ВСП у контексті отримання результату в реальному масштабі часу. Застосування LUT є поширеним методом при розв'язанні обернених вимірювальних задач, хоч цей підхід інколи може погіршити точність результатів, але при цьому значно спрощується процес обробки результатів вимірювань.

Перевагою методу є ефективність використання ресурсів, швидкість обчислення та надійність. Застосування LUT є ефективним з точки зору використання ресурсів, оскільки значення вимірювальних результатів вже обчислені і збережені, що дозволяє уникнути зайвого використання ресурсів під час повторних обчислень, у порівнянні з складними альтернативними алгоритмами оптимізації. Оскільки значення параметрів вимірювання вже попередньо обчислені і збережені в таблиці, для отримання результату не потрібно проводити повторні обчислення, що забезпечує високу швидкість роботи. Використання LUT може зменшити вплив помилок на відтворені дані електрофізичних параметрів ОК, оскільки цей метод є детермінованим і не залежить від початкових умов, що обумовлює його надійність [8].

LUT можна поєднувати з іншими методами для розв'язання обернених

задач для отримання кращих результатів. Варто виділити інтерполяційні та оптимізаційні методи серед засобів для поєднання з LUT. Інтерполяційні методи використовуються для отримання значень шуканих електрофізичних параметрів в точках, які не були попередньо збережені в таблиці LUT. В такому випадку, значення електрофізичних параметрів об'єкта отримуються шляхом інтерполяції між ближчими до заданого вимірювання значень вихідного сигналу ВСП, які були збережені в таблиці LUT. Також метод LUT ефективно поєднується з оптимізаційними методами для пошуку підсумкового розв'язку задачі.

Для розв'язку оберненої задачі вимірювання профілів електрофізичних параметрів ОК в рамках цих досліджень, пропонується застосування дворівневого пошуку по апріорі підготовленій таблиці. На першому етапі пошуку застосовується нарахована заздалегідь таблиця “грубих значень” сигналу напруги ВСП з досить великою дискретизацією і відповідних цьому сигналу параметрів ОК (профілів провідності  $\sigma$  та магнітної проникності  $\mu_r$ , або інших параметрів у випадку розширеної мультифакторної таблиці).

На другому етапі, за знайденими “грубими значеннями” параметрів ОК динамічно формується новий набір проміжних значень параметрів в діапазоні їх найближчих табличних значень. Новий набір створюється за допомогою комп'ютерного плану експерименту на  $R$  послідовностях, і на основі цієї вибірки нараховується і зберігається таблиця другого рівня. Обрахунок значень вихідного сигналу ВСП в таблиці здійснюється з використанням сурогатної моделі, що дозволяє виконати це в реальному масштабі часу. До того ж це дозволяє застосовувати ряд сурогатних моделей з дещо різним накопиченням апріорної інформації, що є важливою особливістю застосування динамічної LUT другого рівня.

Нова “детальна” таблиця другого рівня тимчасово зберігається в пам'яті, що дозволяє перевикористання результату для таких же або подібних за значеннями вхідних параметрів, тобто застосовується метод мемоізації.

Метод мемоізації (memoization), що зазвичай використовується для ви-кликів важких для обчислення функцій в комп'ютерних обчисленнях, а також хешування таблиць значно збільшує швидкість алгоритму (рис. 3.13).

Варто зазначити, що всі операції з пошуку значень в таблицях чи формування нової таблиці за допомогою сурогатної модулі слід виконувати в нормованому вигляді.

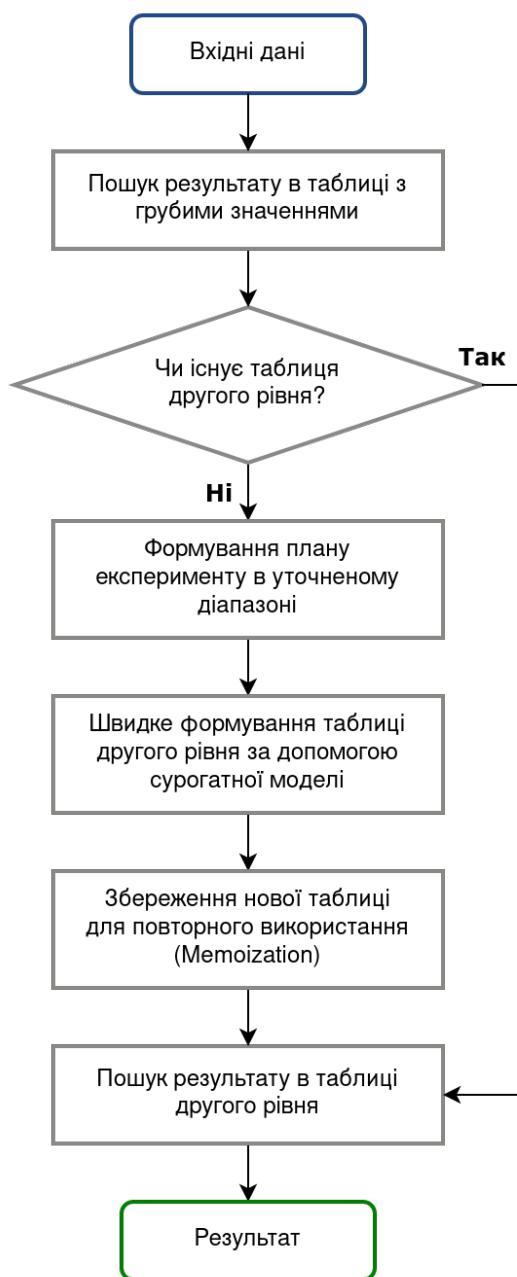


Рис. 3.13. Алгоритм використання дворівневого динамічного LUT.

Наочно цей алгоритм демонструє наступний приклад.

Таблиця 3.18

**Таблиця першого рівня (параметри матеріалу ОК)**

№	$\sigma_1$ , СМ/М	...	$\sigma_{51}$ , СМ/М	$\mu_{r1}$	...	$\mu_{r51}$
1	6,9900E+06	...	3,2380E+06	1,0000E+00	...	8,7095E+00
2	6,9900E+06	...	2,9810E+06	1,0000E+00	...	1,0419E+01
3	6,9900E+06	...	3,7725E+06	1,0000E+00	...	9,1286E+00
4	6,9900E+06	...	3,5155E+06	1,0000E+00	...	1,0838E+01
5	6,9900E+06	...	3,2584E+06	1,0000E+00	...	9,5476E+00
...	...	...	...	...	...	...
996	6,9900E+06	...	3,3463E+06	1,0000E+00	...	8,6827E+00
997	6,9900E+06	...	3,0892E+06	1,0000E+00	...	1,0392E+01
998	6,9900E+06	...	3,8807E+06	1,0000E+00	...	9,1017E+00
999	6,9900E+06	...	3,6237E+06	1,0000E+00	...	1,0811E+01
1000	6,9900E+06	...	3,3667E+06	1,0000E+00	...	9,5208E+00

Вибираємо значення з таблиці грубих значень.

Далі використовується динамічна побудова таблиці другого рівня. За планом експерименту масштабуються проміжні значення змінних, за якими потім формується весь набір значень для вхідних даних сурогатної моделі

В новій таблиці другого рівня, аналогічно до пошуку в таблиці першого рівня, проводиться пошук найближчих значень до тестового зразка вихідного сигналу ВСП, використовуючи для цього значення його амплітуди та фази, які трансформовано в алгебраїчну форму комплексного числа.

Результати вимірювання виділено напівжирним в таблицях другого рівня.

Наведений приклад показує, що метод LUT є ефективним інструментом для розв'язання обернених вимірювальних задач вихрострумової структурокопії. Використання LUT значно зменшує витрати часу та обчислювальних ресурсів на вирішення завдання, що дозволяє розв'язати задачу одночасного визначення профілів параметрів електрофізичних параметрів ОК в реальному масштабі часу.



Таблиця 3.19

**Таблиця першого рівня (параметри сигналу ВСП)**

№	Re(U)	Im(U)	Амплітуда, В	Фаза, рад
1	4,9468E-03	4,2914E-02	4,3198E-02	1,4560E+00
2	4,9815E-03	4,5044E-02	4,5319E-02	1,4607E+00
3	5,1623E-03	4,3246E-02	4,3553E-02	1,4520E+00
4	5,2418E-03	4,5339E-02	4,5641E-02	1,4557E+00
5	5,0194E-03	4,3918E-02	4,4204E-02	1,4570E+00
...	...	...	...	...
996	4,9808E-03	4,2846E-02	4,3135E-02	1,4551E+00
997	5,0239E-03	4,4975E-02	4,5255E-02	1,4596E+00
998	5,1959E-03	4,3177E-02	4,3489E-02	1,4510E+00
999	5,2834E-03	4,5268E-02	4,5575E-02	1,4546E+00
1000	5,0568E-03	4,3850E-02	4,4140E-02	1,4560E+00

Таблиця 3.20

**Тестовий зразок даних для перевірки працездатності алгоритму  
(параметри матеріалу ОК)**

$\sigma_1$ , СМ/М	...	$\sigma_{51}$ , СМ/М	$\mu_{r1}$	...	$\mu_{r51}$
6,9900E+06	...	3,6450E+06	1,0000E+00	...	9,3134E+00

Таблиця 3.21

**Тестовий зразок даних для перевірки працездатності алгоритму  
(параметри сигналу ВСП)**

Re(U)	Im(U)	Амплітуда, В	Фаза, рад
5,1368E-03	4,3509E-02	4,3811E-02	1,4533E+00

Таблиця 3.22

**Результати пошуку найближчих значень в таблиці першого рівня  
(параметри матеріалу ОК)**

№	$\sigma_1$ , СМ/М	...	$\sigma_{51}$ , СМ/М	$\mu_{r1}$	...	$\mu_{r51}$
<b>590</b>	<b>6,9900E+06</b>	...	<b>3,6341E+06</b>	<b>1,0000E+00</b>	...	<b>9,3268E+00</b>
239	6,9900E+06	...	3,6739E+06	1,0000E+00	...	9,2850E+00
855	6,9900E+06	...	3,6788E+06	1,0000E+00	...	9,3498E+00
125	6,9900E+06	...	3,6151E+06	1,0000E+00	...	9,3996E+00

Таблиця 3.23

**Результати пошуку найближчих значень в таблиці першого рівня  
(параметри сигналу ВСП)**

№	Re(U)	Im(U)	Амплітуда, В	Фаза, рад
<b>590</b>	<b>5,1343E-03</b>	<b>4,3528E-02</b>	<b>4,3830E-02</b>	<b>1,4534E+00</b>
239	5,1441E-03	4,3465E-02	4,3768E-02	1,4530E+00
855	5,1521E-03	4,3541E-02	4,3844E-02	1,4530E+00
125	5,1346E-03	4,3621E-02	4,3923E-02	1,4536E+00

Таблиця 3.24

**Таблиця другого рівня (параметри матеріалу ОК)**

№	$\sigma_1$ , СМ/М	...	$\sigma_{51}$ , СМ/М	$\mu_{r1}$	...	$\mu_{r51}$
1	6,9900E+06	...	3,6314E+06	1,0000E+00	...	9,2930E+00
2	6,9900E+06	...	3,6158E+06	1,0000E+00	...	9,3583E+00
3	6,9900E+06	...	3,6638E+06	1,0000E+00	...	9,3090E+00
4	6,9900E+06	...	3,6482E+06	1,0000E+00	...	9,3743E+00
5	6,9900E+06	...	3,6326E+06	1,0000E+00	...	9,3250E+00
...	...	...	...	...	...	...
12	6,9900E+06	...	3,6507E+06	1,0000E+00	...	9,3237E+00
13	6,9900E+06	...	3,6351E+06	1,0000E+00	...	9,3891E+00
14	6,9900E+06	...	3,6195E+06	1,0000E+00	...	9,3398E+00
15	6,9900E+06	...	3,6675E+06	1,0000E+00	...	9,2904E+00
16	6,9900E+06	...	3,6519E+06	1,0000E+00	...	9,3558E+00

Таблиця 3.25

**Таблиця другого рівня (параметри сигналу ВСП)**

№	Re(U)	Im(U)	Амплітуда, В	Фаза, рад
1	5,1281E-03	4,3493E-02	4,5544E-02	1,4500E+00
2	5,1288E-03	4,3574E-02	4,5463E-02	1,4500E+00
3	5,1413E-03	4,3501E-02	4,5523E-02	1,4503E+00
4	5,1422E-03	4,3582E-02	4,5442E-02	1,4503E+00
5	5,1317E-03	4,3530E-02	4,5503E-02	1,4501E+00
...	...	...	...	...
12	5,1380E-03	4,3522E-02	4,5504E-02	1,4503E+00
13	5,1389E-03	4,3603E-02	4,5423E-02	1,4502E+00
14	5,1284E-03	4,3551E-02	4,5486E-02	1,4500E+00
15	5,1408E-03	4,3478E-02	4,5546E-02	1,4503E+00
16	5,1417E-03	4,3559E-02	4,5465E-02	1,4503E+00

Таблиця 3.26

**Результати пошуку найближчих значень в таблиці другого рівня  
(параметри матеріалу ОК)**

№	$\sigma_1$ , СМ/М	...	$\sigma_{51}$ , СМ/М	$\mu_{r1}$	...	$\mu_{r51}$
<b>11</b>	<b>6,9900E+06</b>	...	<b>3,6507E+06</b>	<b>1,0000E+00</b>	...	<b>9,3237E+00</b>
7	6,9900E+06	...	3,6494E+06	1,0000E+00	...	9,2917E+00
2	6,9900E+06	...	3,6638E+06	1,0000E+00	...	9,3090E+00
14	6,9900E+06	...	3,6675E+06	1,0000E+00	...	9,2904E+00

Таблиця 3.27

**Результати пошуку найближчих значень в таблиці другого рівня  
(параметри сигналу ВСП)**

№	Re(U)	Im(U)	Амплітуда, В	Фаза, рад
<b>11</b>	<b>5,1380E-03</b>	<b>4,3522E-02</b>	<b>4,5504E-02</b>	<b>1,4503E+00</b>
7	5,1344E-03	4,3486E-02	4,5544E-02	1,4502E+00
2	5,1413E-03	4,3501E-02	4,5523E-02	1,4503E+00
14	5,1408E-03	4,3478E-02	4,5546E-02	1,4503E+00

### 3.5. Висновки до розділу 3

Алгоритмічне та програмне забезпечення для моделювання є важливою складовою в проведенні досліджень, що може напряму впливати на результати цих досліджень. Правильно обрані алгоритми та засоби дозволяють зменшити кількість експериментів, що необхідні для отримання даних, та спроможні підвищити точність моделювання і подальшого процесу вимірювання.

Результати обчислень обраної та реалізованої “точної” аналітичної моделі на мові програмування Python 3 при верифікації порівнянням з числовим методом скінченних елементів (COMSOL Multiphysics) свідчать про досить високу точність розрахунків за обраною аналітичною моделлю. При верифікації для об’єкту контролю з немагнітного матеріалу максимальна відносна похибка для дійсної та уявної частин векторного потенціалу не перевищує 3% (1,7% в області частот вище 1 кГц). Максимальна похибка обчислень з використанням об’єкта контролю з слабوماгнітного матеріалу є дещо більшою, ніж для попереднього випадку немагнітного ОК, та становить 7,6% в області частот вище 1 кГц, але і в цьому випадку точність результатів можна вважати прийнятною як і для розрахунків з магнітним ОК. Зазначені вище результати верифікації дозволяють вважати реалізовану програмними засобами “точну” модель адекватною.

Показано вибір раціональної частоти струму збудження, що дорівнює 2,5 кГц при наведеному прикладі діапазону вхідних даних. Цей вибір обумовлений діапазоном найбільшої чутливості індукованої напруги до зміни профілів електрофізичних параметрів матеріалу ОК.

Приведено приклади створення однорідних комп’ютерних планів експериментів на R послідовностях для двох, трьох і чотирьох вимірних наборів з 5000 точок. Показано метод створення вибірок для планів експериментів зі зміною профілів електрофізичних характеристик в приповерхневому шарі об’єкту контролю при апроксимації такої зміни відповідно до різних форм

функціональних залежностей.

Проілюстровано декілька прикладів масштабування планів до реальних значень. Для основних прикладів використовувався двох факторний набір даних з 5000 точок в просторі. Значення центрованої розбіжності такого плану експерименту є  $2,84993\text{E-}07$  та циклічна розбіжність становить 3,55556.

В середовищі програмування Python 3 створена сурогатна модель на основі глибоких нейронних мереж з використанням відкритої бібліотеки Keras (Tensorflow backend). На окремому прикладі описано структуру та особливості реалізації та навчання даної сурогатної моделі. Об'єктивні чисельні показники, які характеризують глибокі нейронні мережі, що апроксимують сигнал вихрострумowego перетворювача, мають наступні значення продуктивності: для дійсної складової значення напруги 96,05% та для уявної складової 95,94%. MSE нейронних мереж при нормованих значеннях для дійсної та уявної складових відповідно 0,00044784 і 0,00019249. При перевірці сурогатних моделей на адекватність, значення коефіцієнту детермінації  $R^2$  становлять 0.999578 та 0.9997864, а MAPE дорівнює 0,039814% і 0,026852% для моделей дійсної та уявної складових напруги відповідно.

Наведені вище результати доводять ефективність застосування глибоких нейронних мереж для побудови сурогатних моделей. Завдяки своїм узагальнюючим властивостям та здатністю бути носієм апріорної інформації про процес контролю, нейромережі є засобами апроксимації з прийнятною точністю, що значно заощаджують час в отриманні результату і підвищують якість подальших експериментів в дослідженнях.

Показано приклад застосування дворівневого LUT для розв'язку оберненої вимірювальної задачі. Описано алгоритм формування динамічної таблиці другого рівня з уточненими значеннями.

Обчислювальна технологія розв'язку оберненої вимірювальної задачі продемонстрована на конкретному прикладі, проте є можливим застосування такого підходу з іншими планами експериментів, іншими функціями

апроксимації електрофізичних параметрів та іншими сурогатними моделями й таблицями пошуку.

Це дозволяє стверджувати про створення методу розв’язку обернених вимірювальних задач вихрострумової структуроскопії щодо одночасного визначення профілів електрофізичних параметрів об’єкта контролю в реальному масштабі часу.

### 3.6. Список використаних джерел до розділу 3

1. 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.
2. C. V. Dodd and W. E. Deeds, “Analytical solutions to eddy–current probe coil problems.”, Tech. Rep., Jan. 1967. doi: 10.2172/4499902.
3. C. V. Dodd, J. W. Luquire, W. E. Deeds, and W. G. Spoeri, “Some eddy-current problems and their integral solutions.”, Tech. Rep., Jan. 1969. doi: 10.2172/4783007.
4. E. Uzal, “Theory of eddy current inspection of layered metals”, Ph.D. dissertation, 1992.
5. 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 апріорних 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.
6. D. P. Kingma and J. Ba, *Adam: A method for stochastic optimization*, 2017. doi: 10.48550/arXiv.1412.6980. arXiv: 1412.6980 [cs.LG].
7. В. Я. Гальченко, А. В. Сторчак, Р. В. Трембовецька та В. В. Тичков, “Створення сурогатної моделі для відновлення приповерхневих профілів еле-

лектрофізичних 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.

8. 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>.

## 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, яка описана в даному дослідженні, є те, що для реалізації процесу вимірювання може бути використаний класичний прохідний трансформаторний ВСП разом із вже існуючими серійними дефектоскопами з синусоїдальним струмом збудження та вихідною інформацією про параметри сигналу, які можна зчитати в цифровому вигляді. Таким чином, основна суть методу полягає в обробці сигналу ВСП, який має бути представленим у вигляді даних про його амплітуду і фазу. Також в контексті даного дослідження було запропоновано варіант реалізації спеціалізованого вихрострумowego структуроскопа для визначення електрофізичних параметрів ОК.

Функціональна схема вихрострумowego структуроскопа (рис. 4.1) включає наступні основні компоненти:

- Генератор струму збудження, до якого входить генератор прямого цифрового синтезу (Direct digital synthesizer, DDS) та підсилювач сигналу сигнелатора. 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 сигналу. Вихідний сигнал з ВСП в цьому модулі подається на фазовий детектор та амплітудний детектор



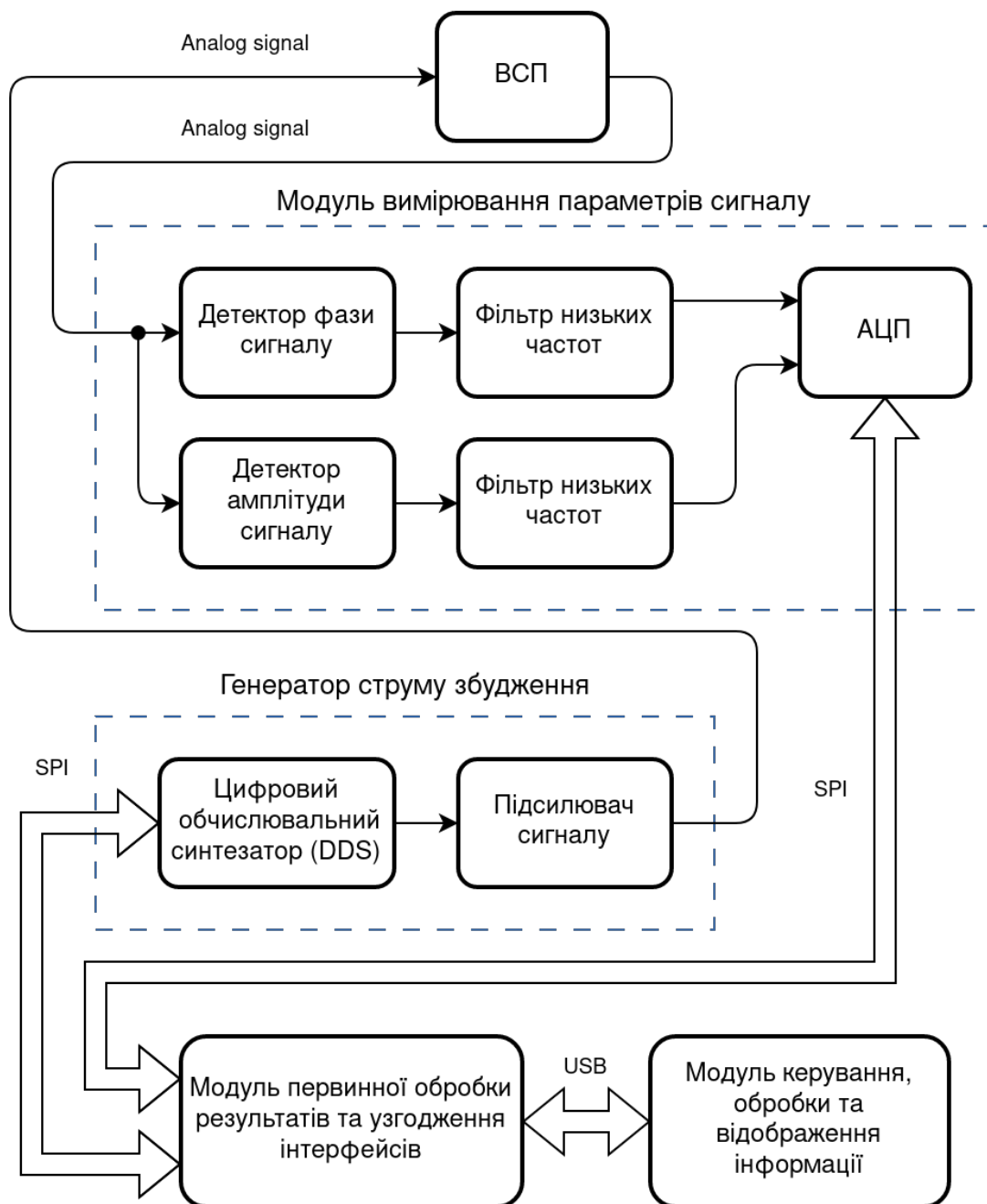


Рис. 4.1. Функціональна схема вихрострумового структуроскопу.

для виділення потрібної інформації. Надалі отримані сигнали згладжуються фільтрами низьких частот другого порядку (ФНЧ) і подаються до АЦП для перетворення в цифрову форму.

- Модуль первинної обробки сигналів та узгодження інтерфейсів. Цей модуль взаємодіє з генератором та модулем вимірювання через два інтерфейси SPI (один до синтезатора, інший — до АЦП), а за допомогою USB (Virtual COM Port, VCP) з модулем керування, обробки та відображення інформації і є зв'язуючою ланкою між ними. Також в ньому відбувається перетворення формату параметрів сигналу та первинна її обробка.
- Модуль керування, обробки та відображення інформації, який слугує для конфігурації параметрів сигналу збудження генератора, опрацювання параметрів сигналу і відображення результату, що дозволяє оператору приладу спостерігати отриману інформацію про структуру та властивості приповерхневого матеріалу досліджуваного ОК.

DDS генератор побудований на мікросхемі AD9834BRUZ (рис. 4.2) та кварцевому генераторі DSC1001CI1-050.0000. AD9834BRUZ — це малопотужний DDS-пристрій з тактовою частотою 50 МГц, здатний генерувати високоякісні синусоїдальні сигнали. Він також має вбудований компаратор, який дозволяє отримати прямокутний сигнал для генерації тактових імпульсів. Останній, в свою чергу, використовується в фазовому детекторі. Частотні регістри цього DDS мають розрядність в 28 біт. Запис в AD9834BRUZ здійснюється за допомогою 3-провідного послідовного інтерфейсу (SPI). Цей послідовний інтерфейс працює на тактовій частоті до 40 МГц і сумісний зі стандартами DSP і мікроконтролерами. Аналогова і цифрова його частини є незалежними і працюють від різних джерел живлення, що зменшує шум від цифрової частини схеми.

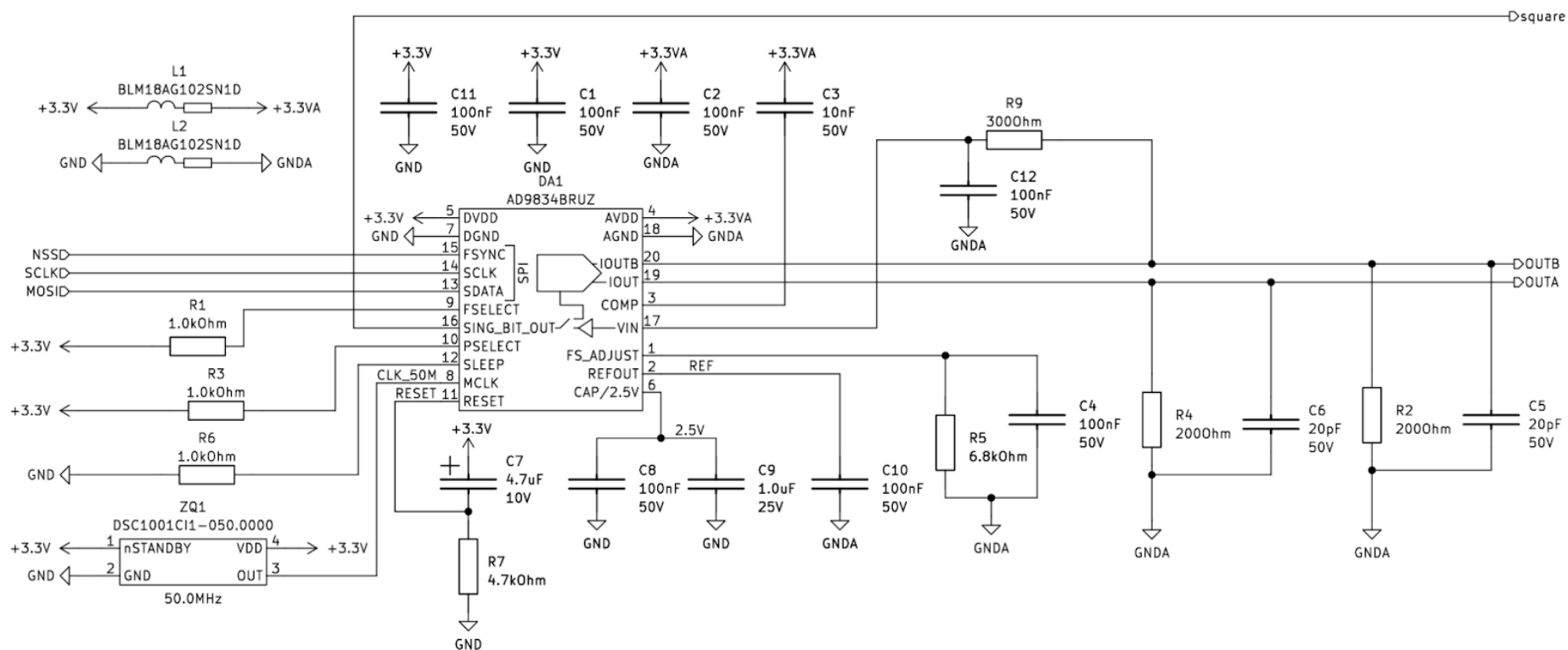


Рис. 4.2. Електрична принципова схема генератора прямого цифрового синтеза.

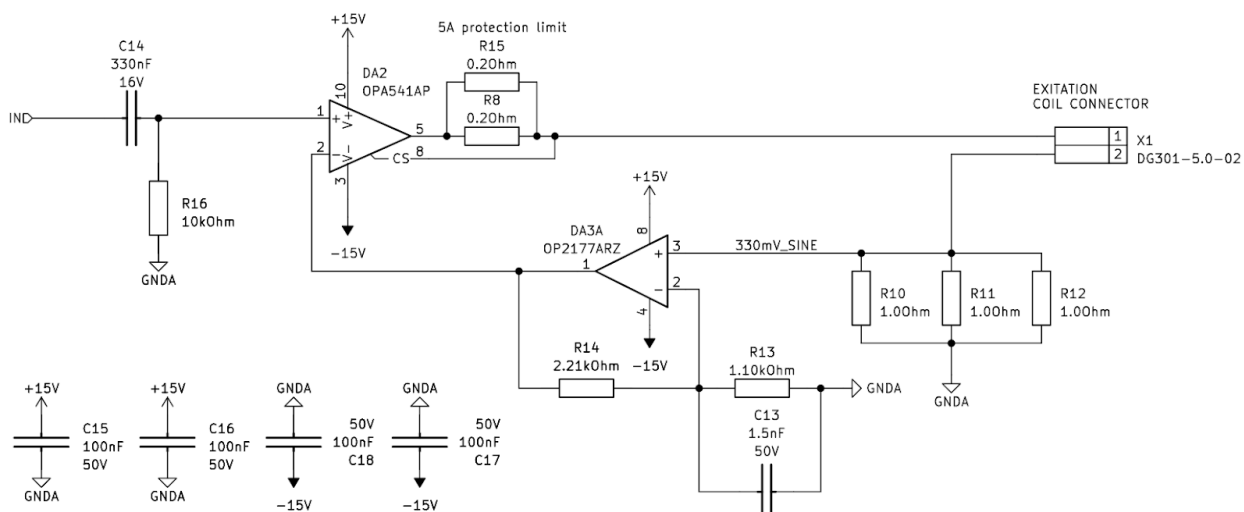


Рис. 4.3. Електрична принципова схема підсилювача сигналу збудження.

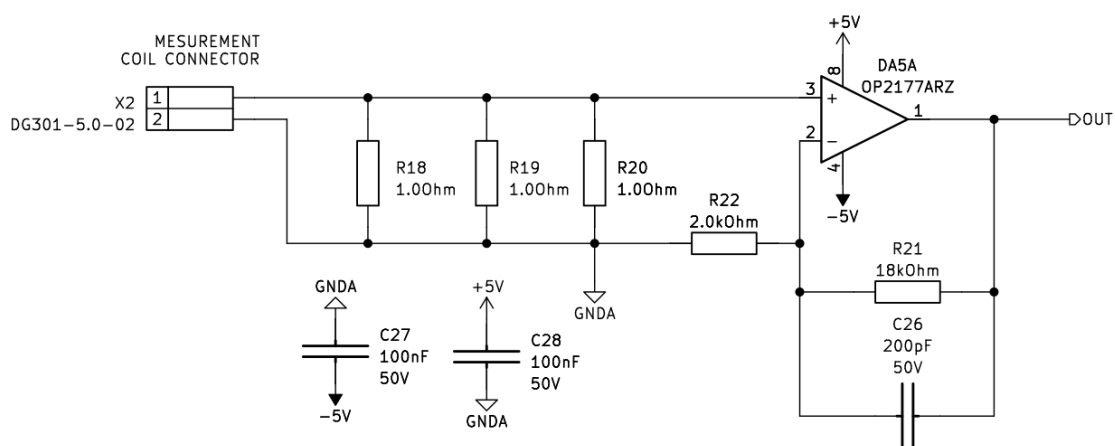


Рис. 4.4. Електрична принципова схема підсилювача сигналу ВСП.

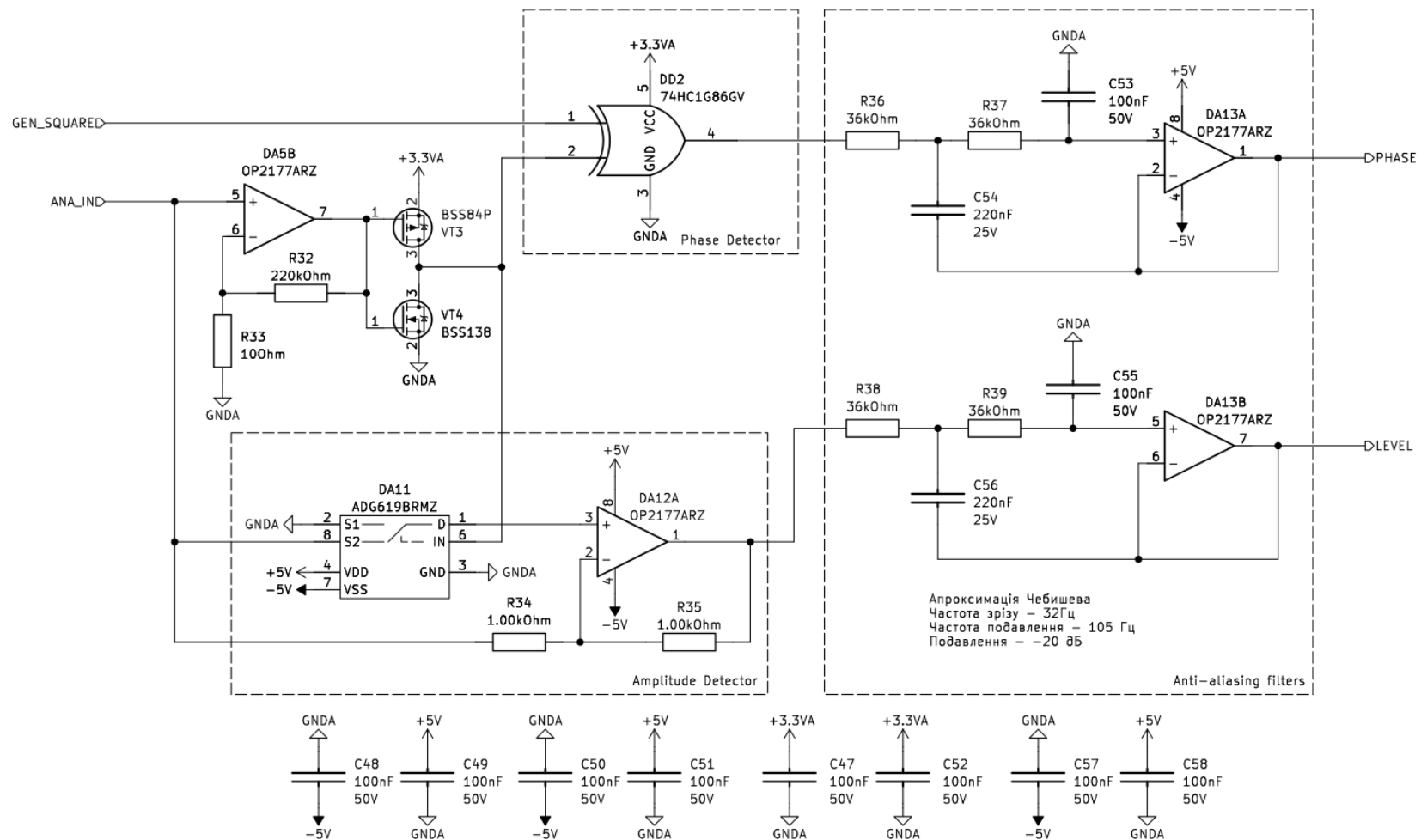


Рис. 4.5. Електричні принципи схем фазового та амплітудного детектора сигналу ВСП з фільтрами низьких частот другого порядку.

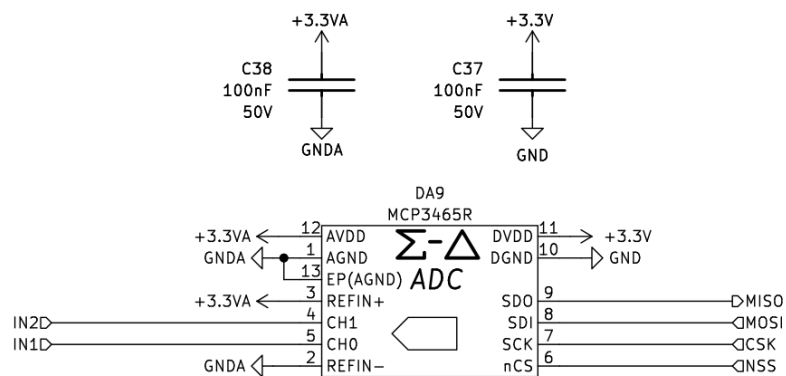


Рис. 4.6. Електрична принципова схема АЦП.

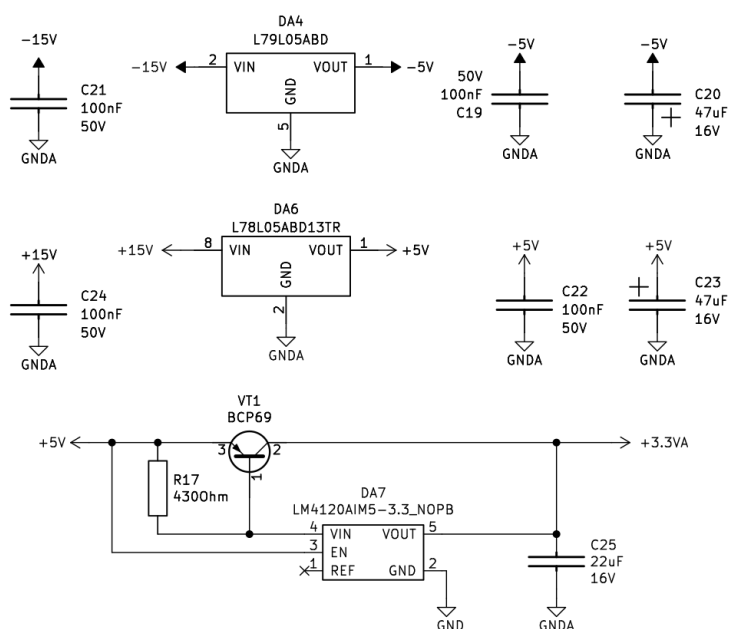


Рис. 4.7. Електричні принципові схеми живлення для цифрових та аналогових частин пристрою.

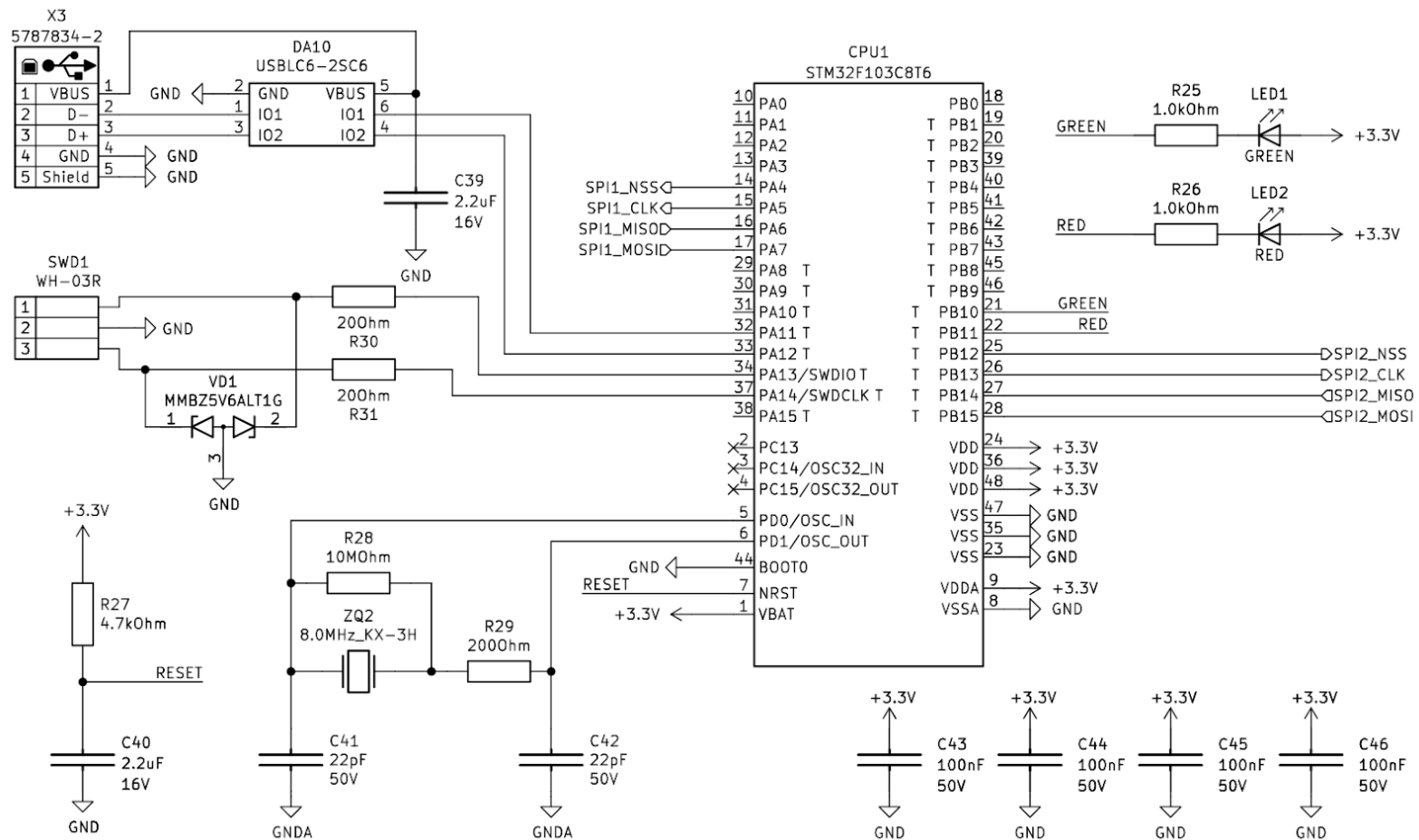


Рис. 4.8. Електрична принципова схема вузла для первинної обробки сигналу та узгодження інтерфейсів.

Підсилювачем сигналу збудження (рис. 4.3) є операційний підсилювач (ОП) високої потужності ОРА541. Цей ОП живиться від  $\pm 15$  В ( $\pm 40$  В max) [1]. Внутрішня схема обмеження струму може бути налагоджена за допомогою одного зовнішнього резистора, що захищає підсилювач від перенавантаження. Максимальний струм такого обмеження може становити до 5 А. Операційний підсилювач DA3A доданий в петлю негативного зворотного зв'язку для узгодження падіння напруги на токовому шунті R10..R12 з вхідною напругою. Таким чином, каскад працює в режимі перетворення напруга - струм збудження ВСП.

Мікросхема ОР2177 складається з двох прецизійних підсилювачів, що мають надзвичайно низьку вхідну напругу зміщення і низький температурний дрейф, характеризуються малим рівнем шуму та низьким енергоспоживанням. Виходи цього ОП стабільні з ємнісними навантаженнями понад 1000 пФ без зовнішньої компенсації. Вона використовується як в схемі драйвера, так і в схемі вимірювання. ФНЧ для фази та амплітуди є активними фільтрами Чебишева 2-го порядку [2], [3] з частотою зрізу 32Гц, частотою подавлення 105Гц і коефіцієнтом подавлення 20 дБ.

Щоб без втрати перетворити змінний сигнал ВСП в позитивні півхвилі без падіння напруги, що властиво класичним детекторам на діоді, використовується схема синхронного амплітудного детектора. Це дозволяє забезпечити лінійну передаточну функцію детектора в більшому динамічному діапазоні (до 4 порядків). Схематично цей вузол виконано на операційному підсилювачі, схему включення якого змінює електронний перемикач ADG619 [4]. В одній позиції перемикач забезпечує неінвертуючу схему включення ОП, в іншій, — інвертуючу. ADG619 — це монолітний однополюсний CMOS-перемикач з подвійним перекиданням (SPDT) та низьким опором 4 Ом, який узгоджується з точністю до 0,7 Ом між каналами. Ці перемикачі також забезпечують низьке розсіювання потужності та при цьому мають високу швидкість перемикання [5], [6].



Фазовий детектор побудований на простому логічному елементі XOR (виключне АБО). Вхідними сигналами є сформовані синхроімпульси внутрішнім компаратором в синтезаторі AD9834BRUZ та перетворений в прямокутні імпульси сигнал з вимірювальної котушки. Дане перетворення забезпечує підсилювач DA5B. А транзистори VT3, VT4 забезпечують узгодження з рівнями TTL логічного елемента. Далі отриманий за рахунок логічного елемента XOR ШІМ сигнал передається на ФНЧ. Така схема забезпечує перетворення діапазону фазових здвигов 0...180 градусів в постійну напругу 0...3.3В.

Варто зазначити, що аналогова частина приладу живиться від окремого джерела живлення, побудованого на мікросхемі LM4120, що є прецизійним малопотужним джерелом опорної напруги, яка керує транзистором BCP69 для підвищення вихідної потужності.

З ФНЧ сигнали амплітуди та фази сигналу фіксуються мікросхемою MCP3465R — це малOSHумний 16-розрядний дельта-сигма аналого-цифровий перетворювач з двома однонаправленими каналами і програмованою швидкістю передачі даних до 153,6 kSPS [7]. АЦП MCP3465R повністю конфігурується з коефіцієнтом передискретизації (OSR) від 32 до 98304 і коефіцієнтом підсилення від 0,33X до 64X. Він включає блок внутрішньої автоматичної вибірки (режим SCAN) та 24-бітний таймер, що дозволяє автоматично створювати послідовності циклів перетворення без необхідності зв'язку з мікроконтролером. MCP3465R також має SPI-сумісний послідовний інтерфейс, що працює на частоті до 20 МГц. Комунікація значно спрощується завдяки 8-бітним командам, включаючи різні режими безперервного читання/запису і 24/32-розрядні формати даних, до яких можна отримати доступ через прямий доступ до пам'яті (DMA) 8-розрядного, 16-розрядного або 32-розрядного мікроконтролера.

Модуль первинної обробки сигналів та узгодження інтерфейсів сформований на 32 бітному ARM мікроконтролері (МК) та його обв'язці. Даний МК

має ядро Cortex™-M3 CPU та може працювати з тактовою частотою до 72 MHz [8]. Для пам'яті програм в МК є 64 Kbytes вбудованої flash пам'яті і 20 Kbytes оперативної пам'яті (SRAM). Також в ньому присутні апаратні модулі SPI та USB (VCP). Це дозволяє йому з легкістю комунікувати з генератором та АЦП по інтерфейсу SPI та обмінюватися командами та інформацією про виміри з модулем керування, обробки та відображення інформації [9], [10].

Модуль керування, обробки та відображення інформації може бути представлений як персональним чи одноплатним комп'ютером, або планшетом з підтримкою USB (VCP).

Представлений варіант архітектури схемотехніки приладу є недорогим у собівартості, але через високоточні генератор струму збудження і АЦП дозволяє проводити якісні та достовірні вимірювання амплітуди та фази сигналу ВСП.

#### **4.2. Особливості технології виконання вимірювань в реальному масштабі часу**

Швидкодія LUT залежить від багатьох факторів, включаючи розмір LUT, швидкість доступу до пам'яті, оптимізації апаратного засобу та алгоритму використання LUT. Наприклад, чим більший розмір LUT, тим більше часу може зайняти пошук в таблиці. Більші LUT потребують більше циклів для доступу до пам'яті та обробки даних. В свою чергу, якщо доступ до пам'яті повільний, це теж уповільнює пошук. Покращити швидкодію LUT можна, використовуючи апаратні засоби, що мають спеціалізовані апаратні ресурси, такі як FPGA або ASIC. Алгоритм пошуку LUT також має суттєвий вплив на швидкодію. Якщо алгоритм пошуку LUT оптимізований для мінімізації затримок та використання кешу, то це значно пришвидшує використання LUT.

В загальному випадку швидкодію LUT оцінити складно, оскільки вона залежить від конкретного апаратного засобу та застосування. Тож необхідно

проводити специфічні випробування та вимірювання для визначення швидкодії LUT у конкретному контексті.

В таблиці 4.1 наведено затрати часу на виконання етапів алгоритму LUT на ПК з операційною системою Ubuntu 16.04 та процесором Intel Core i3-4150.

Таблиця 4.1

**Витрати часу на виконання етапів LUT**

Назва етапу	Обсяг таблиці	Час, мС
Пошук в таблиці 1-го рівня	1000	1,11
	2000	1,29
	3000	1,23
	4000	1,39
	5000	1,39
	10000	1,75
Створення таблиці 2-го рівня (Keras)	8	304,92
	16	291,43
	32	304,68
	64	316,87
	128	307,51
Створення таблиці 2-го рівня (Numpy)	8	35,92
	16	34,12
	32	35,15
	64	39,01
	128	43,53
Пошук в таблиці 2-го рівня	8	1,99
	16	2
	32	2
	64	2,1
	128	3,13

При цьому для порівняння швидкодії, створення динамічної таблиці другого рівня відбувалося двома різними бібліотеками: Keras та Numpy. В обох з

них використовувалися однакові коефіцієнти та ваги для побудови сурогатної моделі на основі DNN, та обчислення проводилися на CPU. Як приклад, сумарна витрата часу на виконання алгоритму, показана в таблиці 4.2. При цьому, таблиця другого рівня була створена сурогатною моделлю з використанням бібліотеки Numpy.

Таблиця 4.2

**Затрати часу (мс) на застосування LUT з динамічним створенням таблиці другого рівня.**

Характеристики таблиць LUT		Обсяг таблиці 1-го рівня		
		1000	3000	5000
Обсяг таблиці 2-го рівня	8	39,02	39,14	39,3
	16	37,23	37,35	37,51
	32	38,26	38,38	38,54
	64	42,22	42,34	42,5
	128	47,77	47,89	48,05

Продемонструємо на прикладі пошук методом LUT, який виконувався за вихідним сигналом ВСП. В якості “невідомого профілю” був взятий контрольний зразок вимірювання, що був заздалегідь обчислений за точною моделлю. Числові значення параметрів контрольного зразка знаходяться в межах значень таблиці першого рівня, але завідомо не співпадають з ними. Вихідний сигнал ВСП складається з двох числових значень: дійсної складової  $\text{Re}(U)$  та уявної  $\text{Im}(U)$ . Визначення найближчих профілів з таблиці пошуку виконується з використанням критерію Евклідової відстані в просторі ознак (4.1), що застосована до двовимірного простору [11].

$$\rho(x, x') = \sqrt{\sum_i^n (x_i - x'_i)^2} \quad (4.1)$$

де  $n = 2$ .

Числові значення, по яким проводиться пошук, мають бути попередньо нормалізованими.

Точність визначення профілів МП та ЕП залежить від кількості зразків профілів в динамічній таблиці другого рівня та складає не більше половини кроку між найбільш віддаленими сусідніми значеннями профілів рис. 4.9.

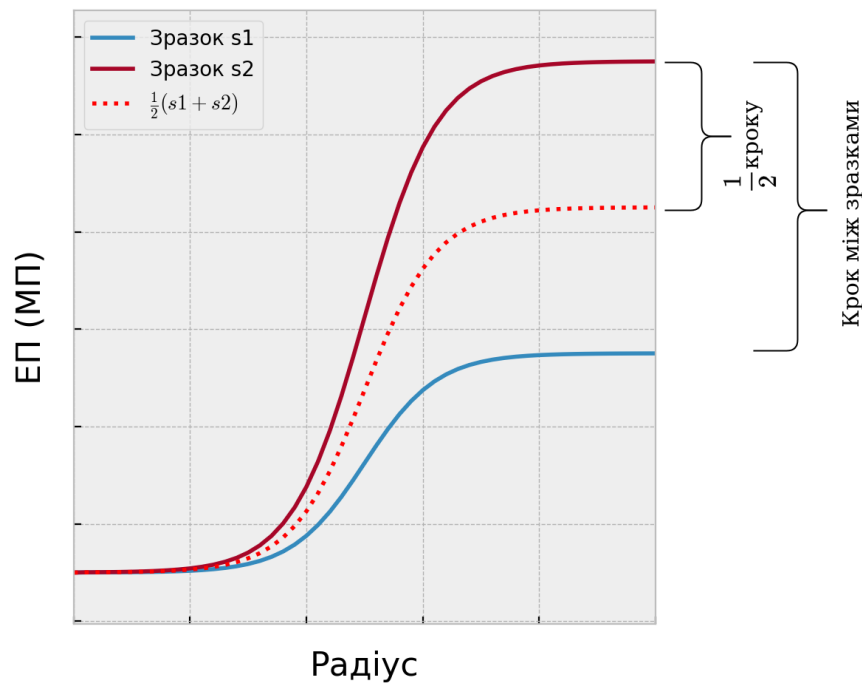


Рис. 4.9. Визначення кроку між зразками в LUT.

Приклад визначення кроку сусідніх профілів в найбільш віддалених точках (ЕП чи МП) показано на рисунку 4.9. Математично крок розраховується відповідно до:

$$\delta_{\sigma} = \frac{\sigma_{s1} - \sigma_{s2}}{2}; \text{См/м}$$

Для МП крок визначається за аналогічною формулою.

Приклад розподілів ЕП та МП наведено на рисунках 4.10 – 4.21 в вигляді графіків. Графіки для їх наочності подано в різних масштабах. Обсяг таблиці першого і другого рівня складає 1000 і 16 зразків відповідно.

Отже, середні затрати часу на виконання повного алгоритму розв'язку

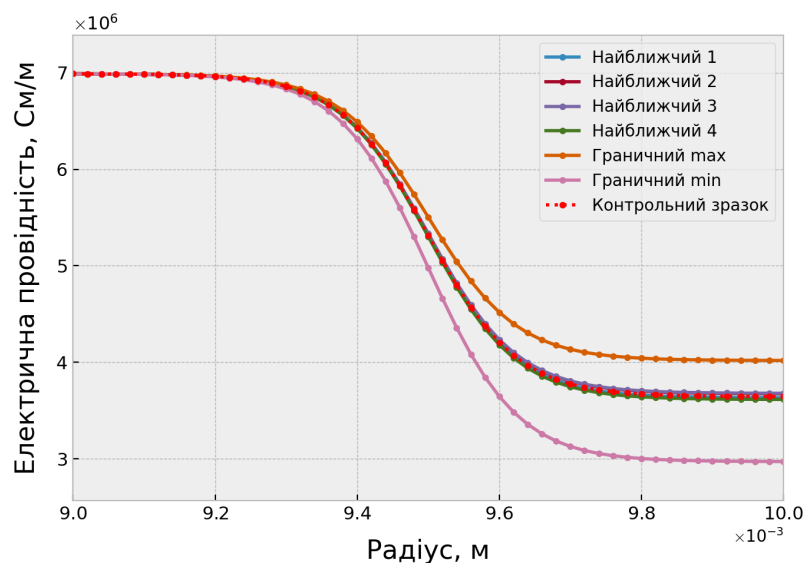


Рис. 4.10. Графічна інтерпретація пошуку найближчих до контрольного зразка профілів ЕП в таблиці 1-го рівня. Зображення радіальних профілів ЕП матеріалу ОК на приповерхневій глибині 1 мм, що містить контрольний, найближчий і граничні профілі з таблиці 1-го рівня.

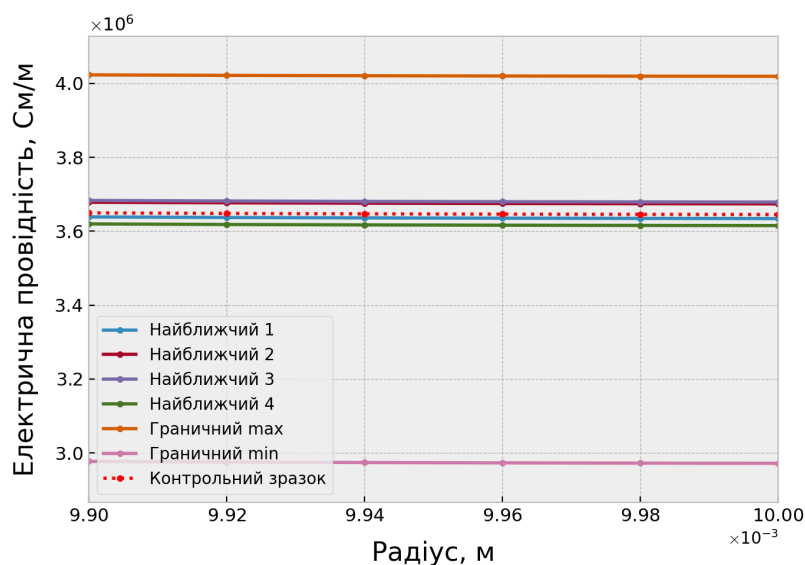


Рис. 4.11. Графічна інтерпретація пошуку найближчих до контрольного зразка профілів ЕП в таблиці 1-го рівня. Зображення радіальних профілів ЕП матеріалу ОК на приповерхневій глибині 0,1 мм, що містить контрольний, найближчий і граничні профілі з таблиці 1-го рівня.

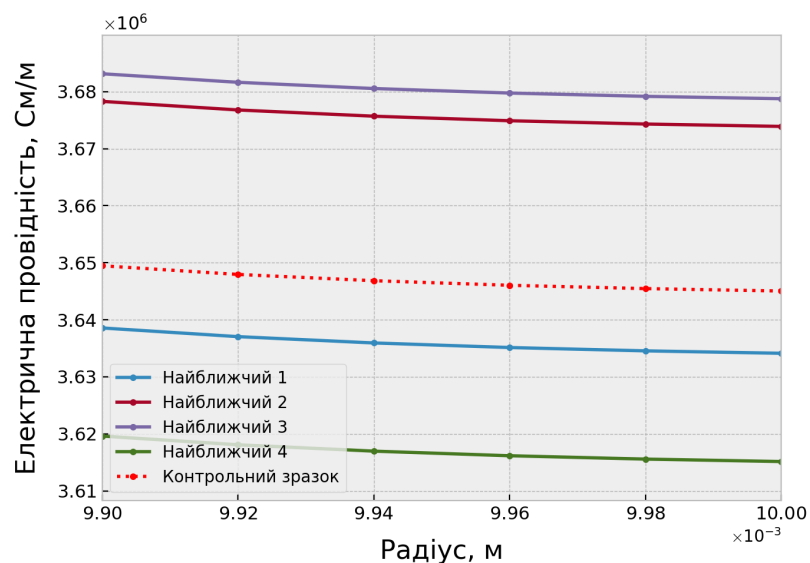


Рис. 4.12. Графічна інтерпретація пошуку найближчих до контрольного зразка профілів ЕП в таблиці 1-го рівня. Зображення радіальних профілів ЕП матеріалу ОК на приповерхневій глибині 0,1 мм, що містить контрольний і найближчий профілі з таблиці 1-го рівня.

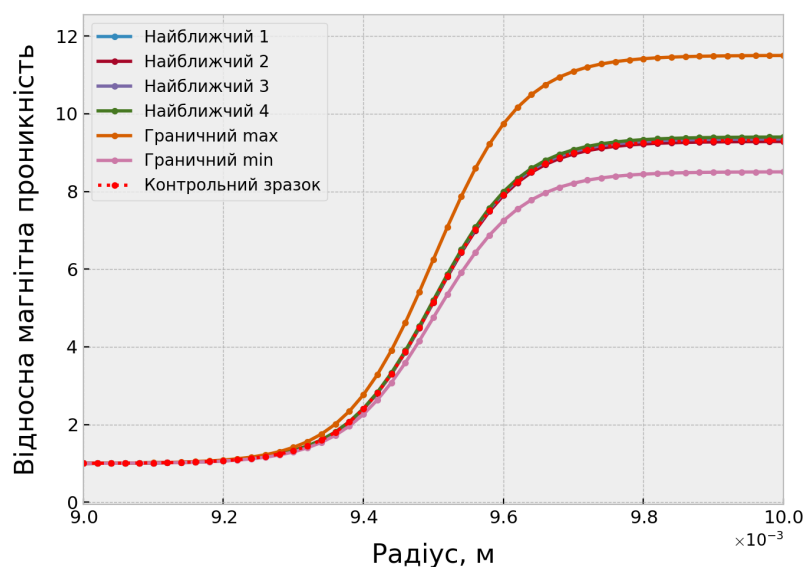


Рис. 4.13. Графічна інтерпретація пошуку найближчих до контрольного зразка профілів МП в таблиці 1-го рівня. Зображення радіальних профілів МП матеріалу ОК на приповерхневій глибині 1 мм, що містить контрольний, найближчий і граничні профілі з таблиці 1-го рівня.

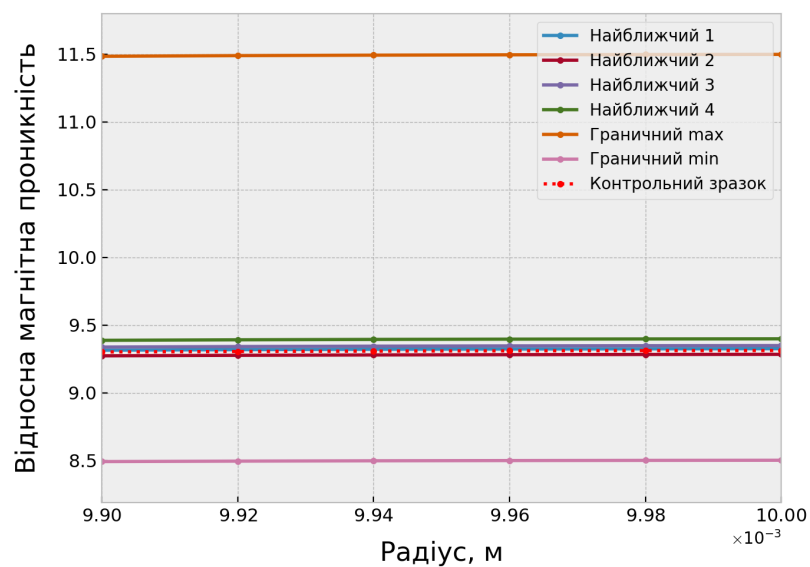


Рис. 4.14. Графічна інтерпретація пошуку найближчих до контрольного зразка профілів МП в таблиці 1-го рівня. Зображення радіальних профілів МП матеріалу ОК на приповерхневій глибині 0,1 мм, що містить контрольний, найближчий і граничні профілі з таблиці 1-го рівня.

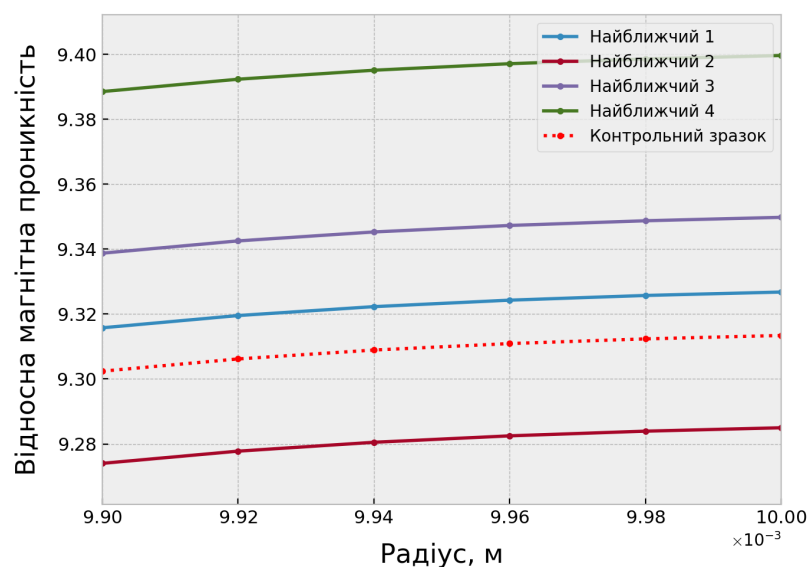


Рис. 4.15. Графічна інтерпретація пошуку найближчих до контрольного зразка профілів МП в таблиці 1-го рівня. Зображення радіальних профілів МП матеріалу ОК на приповерхневій глибині 0,1 мм, що містить контрольний і найближчий профілі з таблиці 1-го рівня.



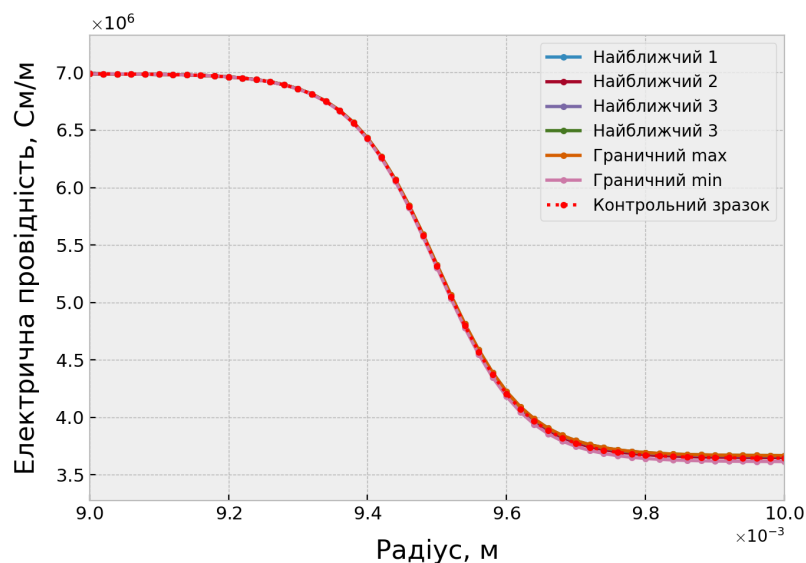


Рис. 4.16. Графічна інтерпретація пошуку найближчих до контрольного зразка профілів ЕП в таблиці 2-го рівня. Зображення радіальних профілів ЕП матеріалу ОК на приповерхневій глибині 1 мм, що містить контрольний, найближчий і граничні профілі з таблиці 2-го рівня.

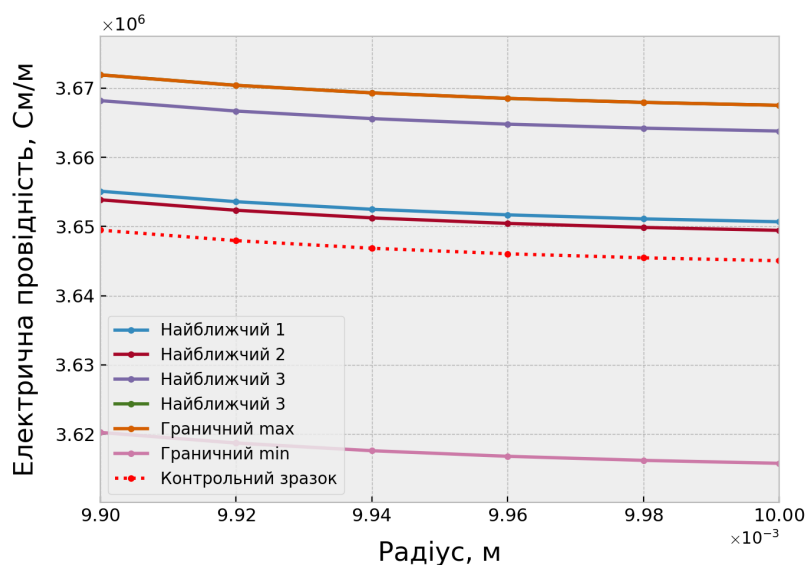


Рис. 4.17. Графічна інтерпретація пошуку найближчих до контрольного зразка профілів ЕП в таблиці 2-го рівня. Зображення радіальних профілів ЕП матеріалу ОК на приповерхневій глибині 0,1 мм, що містить контрольний, найближчий і граничні профілі з таблиці 2-го рівня.

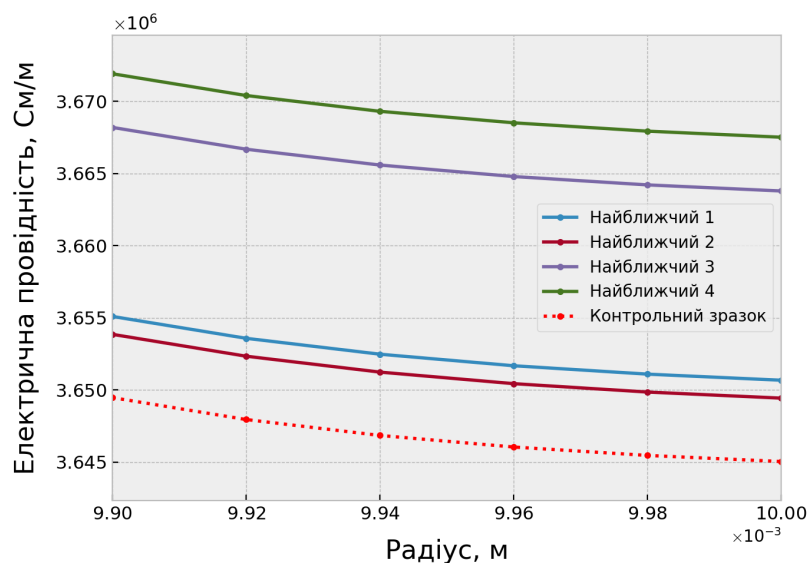


Рис. 4.18. Графічна інтерпретація пошуку найближчих до контрольного зразка профілів ЕП в таблиці 2-го рівня. Зображення радіальних профілів ЕП матеріалу ОК на приповерхневій глибині 0,1 мм, що містить контрольний і найближчий профілі з таблиці 2-го рівня.

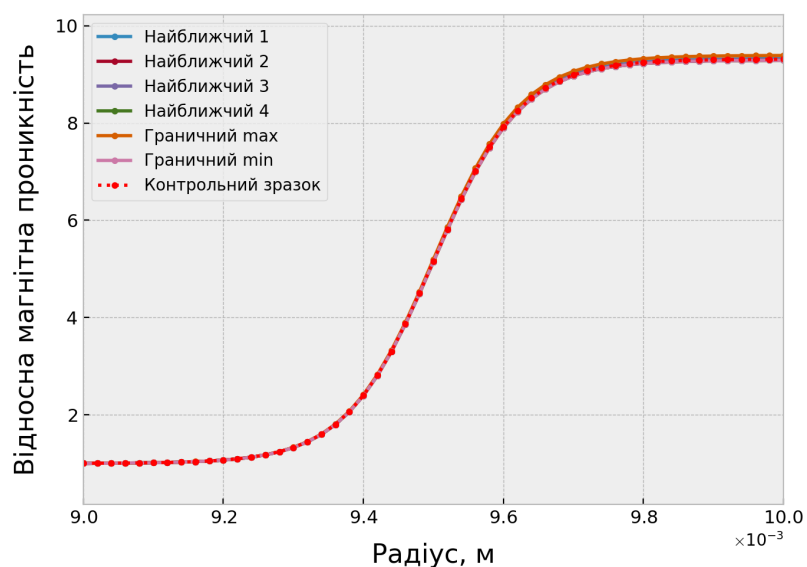


Рис. 4.19. Графічна інтерпретація пошуку найближчих до контрольного зразка профілів МП в таблиці 2-го рівня. Зображення радіальних профілів МП матеріалу ОК на приповерхневій глибині 1 мм, що містить контрольний, найближчий і граничні профілі з таблиці 2-го рівня.

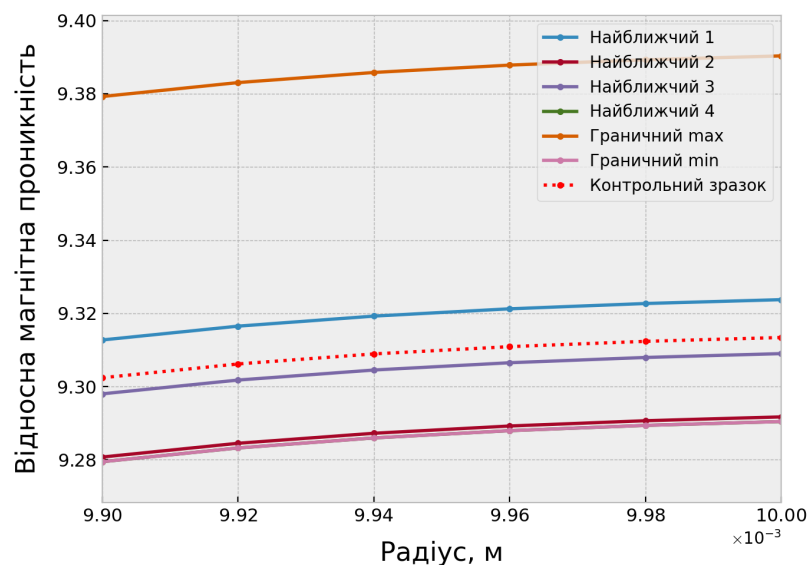


Рис. 4.20. Графічна інтерпретація пошуку найближчих до контрольного зразка профілів МП в таблиці 2-го рівня. Зображення радіальних профілів МП матеріалу ОК на приповерхневій глибині 0,1 мм, що містить контрольний, найближчий і граничні профілі з таблиці 2-го рівня.

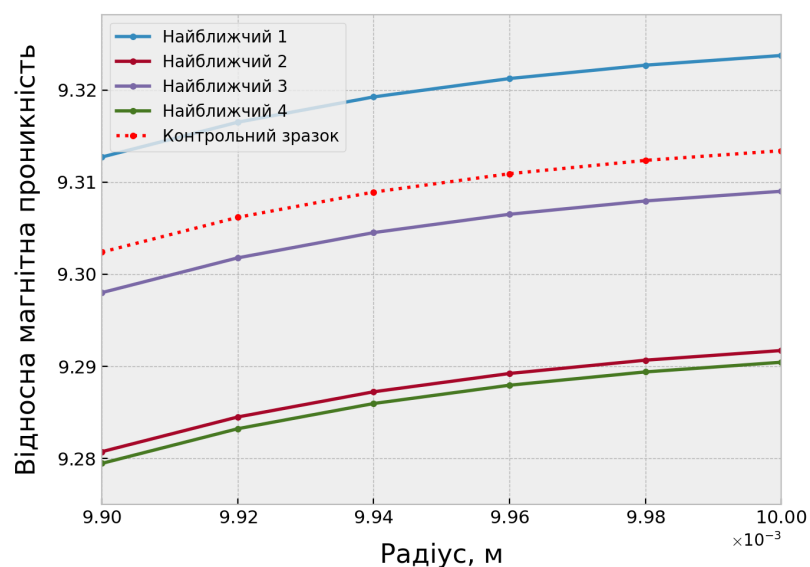


Рис. 4.21. Графічна інтерпретація пошуку найближчих до контрольного зразка профілів МП в таблиці 2-го рівня. Зображення радіальних профілів МП матеріалу ОК на приповерхневій глибині 0,1 мм, що містить контрольний і найближчий профілі з таблиці 2-го рівня.

оберненої вимірювальної задачі за допомогою дворівневого LUT складають близько 38 мС, що дозволяє стверджувати про виконання його в реальному масштабі часу. А застосування мемоїзації таблиці другого рівня зачасти виключить повторне створення таблиці другого рівня і скоротить загальний час до декількох мілісекунд. Точність алгоритму є змінною в залежності від кількості зразків в таблиці і дорівнює половині кроку між ними - це дозволяє збільшувати точність тільки у випадках необхідності і зменшувати її, коли потрібна максимальна швидкодія.

#### **4.3. Висновки до розділу 4**

Даний розділ присвячений опису апаратної частини приладу для вихрострумового контролю ОК та особливостям використання методу Lookip tables з застосуванням динамічної таблиці другого рівня, як засобу розв'язку оберненої задачі визначення радіальних профілів електричної провідності та магнітної проникності циліндричних об'єктів контролю.

В першому підрозділі було запропоновано схемотехніку і описано особливості створення спеціалізованого вихрострумового структуроскопа для визначення електрофізичних характеристик об'єктів контролю. Приведений варіант схемотехніки приладу має високоточні генератор струму збудження і АЦП, що дозволяє проводити якісні та достовірні вимірювання амплітуди та фази сигналу вихрострумового перетворювача.

Варто зазначити, що окрім запропонованого в даному дослідженні приладу, важливою перевагою застосованого підходу до вирішення вимірювальної задачі є можливість використання стандартних серійних дефектоскопів, які використовують синусоїдальний струм для збудження трансформаторних вихрострумових перетворювачів та надають параметри сигналу у цифровому форматі для її подальшої обробки.

Отриманий сигнал в цифровому форматі підлягає обробці програмними

засобами та за цим сигналом відбувається експрес-визначення електрофізичних параметрів об'єктів контролю за допомогою Lookup Tables. Середні затрати часу на виконання повного алгоритму розв'язку оберненої вимірювальної задачі за допомогою дворівневого LUT складають близько 38 мС, що дозволяє стверджувати про виконання його в реальному масштабі часу. При надходженні схожих параметрів сигналу, можливе використання мемоїзації таблиці другого рівня, що скорочує загальний час виконання розв'язку оберненої задачі до декількох мілісекунд.

Точність визначення профілів магнітної проникності та електричної провідності складає не більше половини кроку між найбільш віддаленими сусідніми значеннями профілів в таблиці другого рівня. Так як таблиця другого рівня є динамічною, це дозволяє варіювати її обсягом, що напряду впливає на компроміс між точністю та швидкістю виконання алгоритму LUT.

#### 4.4. Список використаних джерел до розділу 4

1. Texas Instruments, *OPA541: High-power monolithic operational amplifier*, Accessed: 2024-05-27. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa541.pdf>.
2. J. K. Roberge, *Operational Amplifiers: Theory and Practice*. MIT OpenCourseWare, 1975, Accessed through MIT OpenCourseWare. [Online]. Available: <https://ocw.mit.edu/courses/res-6-010-electronic-feedback-systems-spring-2013/pages/textbook/>.
3. M. Steer, *Microwave and RF Design, Volume 5: Amplifiers and Oscillators*. University of North Carolina Press, 2019, isbn: 978-1-4696-5698-4. [Online]. Available: <https://uncpress.org/book/9781469656984/microwave-and-rf-design-volume-5/>.
4. Analog Devices, Inc., *AD9834: 75 MHz low power CMOS complete dds synthesizer*, Accessed: 2024-05-27. [Online]. Available: <https://www.>

analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9834.pdf.

5. А. Войцицький та М. Войцицький, *Електроніка і мікросхемотехніка*, 2-е вид. Гельветика, 2018, видання друге, виправлене, isbn: 978-966-289-211-6.
6. В. Сташук, *Радіоелектронні кола і пристрої*. Видавництво не вказане, 2024, isbn: 966-388-089-9. url: <https://www.yakaboo.ua/ua/radioelektronni-kola-i-pristroi.html>.
7. Microchip Technology Inc., *MCP3465R: 16-bit, 153.6 kSPS, 1.8v-5.5v delta-sigma adc with integrated pga, internal oscillator and reference*, Accessed: 2024-05-27. [Online]. Available: <https://www.microchip.com/en-us/product/mcp3465r>.
8. STMicroelectronics, *STM32F103C8: Mainstream performance line, ARM®-based 32-bit mcu with 64 KB flash, 72 MHz CPU, motor control, Can*, Accessed: 2024-05-27. [Online]. Available: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103c8.html>.
9. В. М. Рябенський, В. Я. Жуйков та В. Д. Гулий, *Цифрова схемотехніка*, Ukrainian. Новий світ-2000, 2020, isbn: 978-966-418-067-9.
10. М. П. Матвієнко, *Проектування цифрових пристроїв*, Ukrainian. Ліра-К, 2021, isbn: 978-617-7605-59-0.
11. І. Добротвор, П. Стухляк, А. Микитишин та М. Митник, *Аналіз систем розпізнавання образів структури композитів*. Тернопіль, 2018, с. 47—48.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язана актуальна прикладна науково-технічна задача, яка має суттєве значення для промисловості та полягає у створенні системи вихрострумowego спільного одночасного вимірювання обох приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об'єктів контролю. Програмне забезпечення системи реалізовано із застосуванням створеного експрес-методу, який передбачає апіорне накопичення даних щодо процесу вихрострумowego вимірювання у нейромережевій сурогатній моделі та наступне її використання для виконання вимірювань у реальному масштабі часу у динамічній таблиці другого рівня при швидкому пошуку розв'язку задачі за технологією Lookup tables.

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 та розроблення низки багатовимірних комп'ютерних однорідних планів експериментів з гарантовано низькими показниками розбіжностей на основі квазівипадкових R-послідовностей Робертса, що забезпечують введення апіорної інформації щодо умов вимірювань профілів ОК з врахуванням найбільш впливових факторів, в тому числі і надлишкових. Апі-

орною інформацією є закони розподілу електрофізичних властивостей, частота збудження поля зондування, локальні зміни радіуса об'єкта, тобто величина повітряного зазору. Наведено приклади створених планів, зокрема, двофакторний план з 5000 точок, що характеризується центрованою  $2,84993\text{E-}07$ , та циклічною  $3,55556$  розбіжностями.

3. Створені засоби формування навчальних вибірок для побудови сурогатної моделі на основі «точної» математичної моделі фізичного процесу взаємодії електромагнітного поля з циліндричними об'єктами контролю та однорідних планів експерименту. Для “точної” моделі розроблено програмне забезпечення на мові Python 3 для обчислення сигналу прохідного трансформаторного вихрострумове перетворювача. Його верифікація проведена порівнянням з результатами обчислень за двома спрощеними аналітичними моделями для двохшарового об'єкта контролю і числовим методом скінченних елементів (COMSOL Multiphysics) та свідчить про досить високу точність розрахунків створеного програмного забезпечення. При верифікації з об'єктом контролю із немагнітного матеріалу максимальна відносна похибка для дійсної та уявної частин векторного потенціалу не перевищує 3% (1,7% в області частот вище 1 кГц). Максимальна похибка обчислень з використанням об'єкта контролю із слабомагнітного матеріалу становить 7,6% в області частот вище 1 кГц, але і в цьому випадку точність результатів можна вважати прийнятною для електромагнітних розрахунків.
4. Розроблений метод створення апроксимаційної нейромережевої сурогатної моделі процесу вихрострумове контролю циліндричних об'єктів прохідними трансформаторними перетворювачами, що є високопродуктивним засобом для швидкого розв'язку оберненої вимірювальної задачі визначення профілів, в тому числі як носій і нако-



пичувач апріорної інформації. Створена сурогатна модель на ресурсозатратну “точну” модель вихрострумowego контролю, яка розроблена в середовищі програмування Python 3 на основі глибоких нейронних мереж. Об’єктивні чисельні показники моделі, що апроксимує сигнал вихрострумowego перетворювача у вигляді комплексного значення напруги, мають наступні значення продуктивності: для дійсної складової значення напруги 96,05% та для уявної складової 95,94%. Похибки MSE нейронних мереж при нормованих значеннях для дійсної та уявної складових дорівнюють відповідно 0,00044784 і 0,00019249. При перевірці сурогатних моделей на адекватність значення коефіцієнту детермінації  $R^2$  становлять 0,999578 та 0,9997864, а MAPE дорівнює 0,039814% і 0,026852% для моделей дійсної та уявної складових напруги відповідно.

5. Розроблений експрес-метод та апаратна і програмна складові системи для вимірювання профілів ЕП та МП у реальному масштабі часу. Математично метод оснований на винятковій здатності швидкого розв’язку рівнянь Максвелла без фактичного явного виконання такого розв’язку завдяки апроксимації глибокими нейронними мережами точної моделі вихрострумowego контролю та використанні дворівневих таблиць пошуку Lookup tables. Наведено приклад застосування дворівневого Lookup tables для розв’язку оберненої вимірювальної задачі, що використовує алгоритм формування динамічної таблиці другого рівня для пошуку уточнених профілів. Середні затрати часу на виконання повного алгоритму розв’язку оберненої вимірювальної задачі за допомогою дворівневого LUT складають близько 38 мс, що дозволяє стверджувати про виконання його в реальному масштабі часу. Точність визначення профілів магнітної проникності та електричної провідності становить не більше половини кроку між найбільш віддаленими сусідніми значеннями профілів в таблиці другого рівня. Для

конкретного прикладу вимірювання профілів, наведеного в дисертації, максимальні приведені похибки їх ідентифікації не перебільшують 0,5%.

Запропоновано схемотехніку і описано особливості створення спеціалізованого вихрострумowego структуроскопа для визначення електрофізичних характеристик ОК. Приведений варіант схемотехнічних рішень приладу має високоточні генератор струму збудження і АЦП, що дозволяє проводити точні та достовірні вимірювання амплітуди та фази сигналу вихрострумowego перетворювача. В даній архітектурі модуль керування, обробки та відображення інформації може бути представлений як персональним чи одноплатним комп'ютером, або планшетом з підтримкою USB (VCP) для отримання даних про амплітуду і фазу сигналу в цифровому вигляді. Важливою перевагою підходу до вирішення вимірювальної задачі є можливість використання стандартних серійних дефектоскопів, які використовують синусоїдальний струм для збудження трансформаторних вихрострумowych перетворювачів та надають параметри сигналу у цифровому форматі для її подальшої обробки.

6. Результати виконаних теоретичних та експериментальних досліджень впроваджені в практику промислових підприємств: ТОВ Арманд Трейд (м. Черкаси); АТ “Укрзалізниця”, Служба Вагонного Господарства, виробничий підрозділ “Експлуатаційне Вагонне Депо Знам'янка” (м. Знам'янка, Кіровоградська область). Вони також впроваджені в навчальний процес кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету та навчальний процес кафедри виробництва приладів приладобудівного факультету НТУУ “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”.

Отже, в результаті проведених досліджень створено новий багатопа-

раметровий експрес-метод одночасного вихрострумового вимірювання радіальних приповерхневих профілів електрофізичних параметрів циліндричних об'єктів контролю з апіорним накопиченням інформації щодо них. Метод поєднує в собі натурні вимірювання та модельні розрахунки із застосуванням високопродуктивних обчислювальних технологій штучного інтелекту на основі нейронних мереж, які проводяться як попередньо з метою отримання специфічних відомостей щодо об'єктів, так і безпосередньо в процесі виконання вимірювань для швидкого отримання результату. Метод є універсальним та може бути поширений на багатопараметровий вимірювальний контроль з одночасним додатковим визначенням діаметру циліндричного об'єкта, а також узагальнений на аналогічні вихрострумові вимірювання.

## 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, “Nonlinear 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 вихрострумівих 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 ме-*

- 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 вихрострумowego контролю циліндричних провідних виробів”, в *Обробка сигналів і негаусівських 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 вихрострумowego 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 вихрострумовой 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 вихрострумowego 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 вихрострумів 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 вихрострумів перетворювачів”, в *Матеріали XV міжнародної конференції “Контроль і управління”*



- ння 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 сільсько-му 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: 5-та Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми інформатизації» (м. Черкаси – Баку – Бельсько-Бяла – Полтава, 2017);

Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно-небезпечних об'єктах» (м. Харків, 2018); 2-nd scientific conference with international participation «Non-Destructive Testing in Context of the Associated Membership of Ukraine in the European Union» (Poland, Lublin, 2018); науково-практична конференція «Інформатика, математика, автоматика» (м. Суми, 2019); науково-практична конференція «Фізика, електроніка, електротехніка» (м. Суми, 2019); VII-ма Міжнародна науково-практична конференція «Обробка сигналів і негаусівських процесів» (м. Черкаси, 2019); VIII-ма Міжнародна науково-технічна конференція «Датчики, прилади та системи» (м. Черкаси – Херсон – Лазурне, 2019); Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно-небезпечних об'єктах» (м. Харків, 2019); V-th International Scientific-Practical Conference «Information Technologies in Education, Science and Technology» (Cherkasy, 2020); науково-практична конференція «Інформатика, математика, автоматика» (м. Суми, 2020); науково-практична конференція «Фізика, електроніка, електротехніка» (м. Суми, 2020); XXI-а Міжнародна конференція з математичного моделювання (м. Херсон, 2020); Восьма Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми інформатизації» (м. Черкаси – Харків - Баку – Бельско-Бяла, 2020); 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 безразрушительный контроль» (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 Між-

народна 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;
- Міжнародний симпозіум "Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки" (SIEMA'2020) Харків, 29–30 жовтня 2020 р., онлайн доповідь;
- Міжнародної науково-практичної on-line конференції "Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві" Кропивницький, 11–12 листопада 2020 р., онлайн доповідь;
- XI Міжнародна науково-технічна конференція "Датчики, прилади та системи" (ДПС-2024) Черкаси, 30–31 травня 2024 р., онлайн доповідь;

Додаток Б

**Акти впровадження**



**Затверджую**

Декан приладобудівного факультету  
Національного технічного університету  
України "Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського",  
доктор технічних наук, професор

 Григорій ТИМЧИК

“        ”        2023 р.

### **Акт**

практичного використання результатів дисертаційної роботи

**Сторчака Анатолія Вячеславовича**

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

в навчальному процесі Національного технічного університету України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Ми, що підписались нижче, заступник декана з методичної роботи кандидат технічних наук, доцент Філіппова Марина В'ячеславівна, професор кафедри виробництва приладів, доктор технічних наук Антонюк Віктор Степанович, вчений секретар кафедри Подолян Олександр Олександрович, склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи аспіранта кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету Сторчака Анатолія Вячеславовича "Система вихрострумового вимірювання приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об'єктів" використовуються в навчальному процесі кафедри виробництва приладів приладобудівного факультету НТУУ "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", а саме: при читанні лекцій, проведенні лабораторних і практичних занять, виконанні курсових проектів з навчальних дисциплін: "Моделювання та оптимізація інформаційно-вимірювальних систем", "Системи і методи контролю якості та технічної діагностики", "Проектування комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних систем", "Комп'ютеризація вимірювальних процесів", в яких використовуються наступні науково-технічні результати

дисертаційної роботи: комп'ютерні методи планування однорідних багатовимірних експериментів; методи створення сурогатних моделей, в тому числі із використанням глибоких нейронних мереж; методи та засоби для розв'язку обернених задач в реальному масштабі часу.

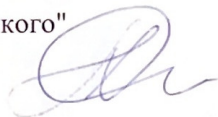
Використання здобувачами першого, другого та третього рівнів вищої освіти науково-технічних результатів дисертаційної роботи Сторчака А.В. дозволяє їм детально ознайомитися з сучасними методами та засобами вихрострумowego вимірювання радіальних профілів електрофізичних параметрів циліндричних об'єктів контролю та набути навичок проведення наукових комп'ютерних експериментів із застосуванням глибоких нейромереж.

Заступник декана приладобудівного  
факультету НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського"  
з методичної роботи,  
кандидат технічних наук, доцент



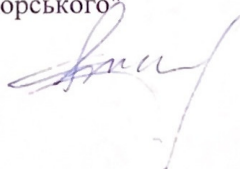
Марина ФІЛІПОВА

Професор кафедри виробництва  
приладів НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського"  
доктор технічних наук, професор



Віктор АНТОНЮК

Вчений секретар кафедри виробництва  
приладів НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського"  
кандидат технічних наук, доцент



Олександр ПОДОЛЯН



**ЗАТВЕРДЖУЮ:**

В.о. ректора Черкаського державного  
технологічного університету,  
д-р політ. наук, професор



Олег ГРИГОР

2023 р.

**АКТ**

впровадження в навчальний процес

Черкаського державного технологічного університету

результатів дисертаційної роботи **Сторчака Анатолія Вячеславовича**

на тему: **“Система вихрострумowego вимірювання приповерхневих  
радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об'єктів”**

Основні результати дисертаційного дослідження Сторчака А.В. впроваджені в навчальний процес кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій при виконанні курсових робіт та проєктів, при викладанні лекцій, проведенні лабораторних та практичних занять з навчальних дисциплін: “Основи комп'ютерного моделювання процесів та засобів вимірювання”, “Проектування та моделювання інформаційно-вимірювальних систем”, “Оптимізація прийняття рішень у техніці”, “Випробування та контроль якості продукції”, “Математичні методи оптимізації та моделювання систем і процесів”, зокрема:

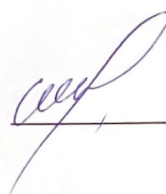
- методологія вихрострумowego вимірювання приповерхневих профілів розподілення електрофізичних параметрів матеріалу об'єктів контролю та використання комп'ютерних систем неруйнівного контролю;
- методи побудови оптимальних багатовимірних однорідних комп'ютерних планів експериментів на основі квазі-випадкових послідовностей Соболя та R послідовностей Робертса;
- ефективні підходи до побудови адекватних сурогатних моделей процесу вихрострумowego контролю з використанням глибоких нейронних мереж;

– алгоритми та програми для моделювання процесу вихрострумowego вимірювального контролю багат шарових циліндричних об'єктів за «точними» електродинамічними моделями для прохідних вихрострумowych перетворювачів на мові програмування Python 3;

– методи та програмне забезпечення для вихрострумowego вимірювання приповерхневих профілів розподілення електрофізичних параметрів матеріалу циліндричних об'єктів контролю в реальному масштабі часу.

Використання результатів дисертаційної роботи Сторчака А.В. дозволяє здобувачам третього освітньо-наукового рівня вищої освіти на високому науково-технічному рівні проводити наукові дослідження, а здобувачам вищої освіти першого та другого рівня виконувати кваліфікаційні роботи бакалавра та магістра.

Начальник навчально-  
методичного відділу,  
канд. екон. наук, доцент



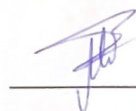
Сергій МИЛЬНІЧЕНКО

Декан факультету електронних  
технологій, автотранспорту  
та машинобудування,  
канд. техн. наук, доцент



Андрій ЧОРНИЙ

Завідувач кафедри приладобудування,  
мехатроніки та комп'ютеризованих  
технологій, д-р техн. наук, професор



Максим БОНДАРЕНКО





АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО  
«УКРАЇНСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ»  
АТ «УКРЗАЛІЗНИЦЯ»

uz.gov.ua

## СЛУЖБА ВАГОННОГО ГОСПОДАРСТВА

### ВИРОБНИЧИЙ ПІДРОЗДІЛ «ЕКСПЛУАТАЦІЙНЕ ВАГОННЕ ДЕПО ЗНАМ'ЯНКА»

Вул. Партизанська, 63А, м. Знам'янка, Кіровоградська область, 27400  
тел.: (98300) 22-55; тел./факс (98300) 20-08

13 лютого 2023

Вих.№ 2652

### АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Сторчака Анатолія Вячеславовича

на тему: «Система вихрострумowego вимірювання приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об'єктів»

Сучасне виробництво деталей залізничного транспорту передбачає термічну та термохімічну обробку їх поверхонь. Отже контроль якості цих технологічних процесів є обов'язковою складовою виробництва. Після обробки деталей азотуванням, гартуванням, цементацією, покриттям нітридом титану тощо, змінюються фізико-механічні властивості матеріалу приповерхневого шару матеріалу виробів. Завдяки кореляційним зв'язкам електричної провідності та магнітної проникності з фізико-механічними властивостями матеріалу можна отримати інформацію про такі атрибути приповерхневого шару матеріалу як в'язкість, пластичність, твердість, теплоємність, міцність, хімічний і фазовий склад. В свою чергу, вихрострумний метод вимірювання дозволяє в реальному масштабі часу ідентифікувати профілі електрофізичних параметрів.

Здобувачем Сторчаком А.В. створений метод вимірювання приповерхневих радіальних профілів електрофізичних параметрів матеріалу циліндричних об'єктів. Запропонований ним метод неруйнівного вимірювального контролю осей, валів силових агрегатів, частин трансмісії і підвіски рухомого складу є не тільки ефективним щодо попередження аварій через вихід з ладу неякісних деталей та запчастин, але й є економічно вигідним.

Експлуатаційне вагонне депо Знам'янка відзначає ефективність практичного використання, розробленого в ході дисертаційного дослідження вихрострумowego експрес-методу для контролю якості термічної обробки циліндричних деталей для рухомого складу залізниці.

Заступник експлуатаційного вагонного  
депо Знам'янка

Олександр ШЕЛУДЬКО



ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «АРМАНД ТРЕЙД»

Код ЄДРПОУ 37930393  
 р/р 26001362112300, МФО 351005 в АТ «УкрСиббанк»  
 ІПН 379303923019, свідоцтво ПДВ 200041399  
 вул. Громова, буд. 34/1, кв. 58, Черкаська обл., м. Черкаси, 18015 Тел. 0472 507 307

В.о. ректора Черкаського державного  
 технологічного університету  
 Олегу ГРИГОРУ

#### АКТ

Підтверджуємо передачу ТОВ АРМАНД ТРЕЙД комп'ютерної програми «Вимірювання приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об'єктів прохідним вихрострумовим перетворювачем», створеної за результатами дисертаційного дослідження Сторчака Анатолія Вячеславовича «Система вихрострумового вимірювання приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об'єктів», для подальшого використання підприємством.

Директор ТОВ АРМАНД ТРЕЙД



Юрій ШМАГАЙЛО

**Автосалон**

вул. Одеська, 8, корп. 42, 18000, м. Черкаси, Україна  
 Тел: 0472 506 846 Факс: 0472 32 13 10 E-mail: armand@armand.ck.ua

**Автосервіс**

вул. Смілянська, 130, 18000, м. Черкаси, Україна  
 Тел / Факс: 0472 507 307 E-mail: service@armand.ck.ua

**Mobil**