

**ІНСТИТУТ ЗАГАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Созонов Станіслав Вікторович

УДК 620.179.16 : 681.518.3

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ УЛЬРАЗВУКОВОГО МАГНІТОСТРИКЦІЙНОГО
МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ЕЛЕМЕНТІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ**

175 – Інформаційно-вимірювальні технології

17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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


С.В. Созонов

Науковий керівник: Декуша Олег Леонідович, докт. техн. наук, ст. досл.

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Созонов С. В. Удосконалення ультразвукового магнітострикційного методу контролю елементів енергетичного обладнання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 175 – Інформаційно-вимірювальні технології, галузь знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації. – Інститут загальної енергетики Національна академія наук України, Київ, 2026.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу удосконалення ультразвукового контролю елементів енергетичного обладнання з використанням малоапертурних магнітострикційних перетворювачів. Було проведено комплексний аналіз методів ультразвукового неруйнівного контролю на базі ультразвукових магнітострикційних ефектів. Описані труднощі реалізації, які виникають при ультразвуковому контролі елементів енергетичного обладнання та надана класифікація дефектів. Приведені основні етапи формування та опрацювання сигналів малоапературних магнітострикційних перетворювачів (ММП) та змодельовані процеси генерування сигналів ММП в електроакустичних трактах засобів ультразвукового контролю. Також були змодельовані процеси опрацювання сигналів ММП та оцінювання їх інформативних параметрів, які дають можливість отримати вибірки інформаційних характеристик сигналів ММП. Був розроблений інтерфейс користувача для УЗНК з ММП і описана реалізація алгоритму частотної фільтрації. Використання апаратно-програмного комплексу та реалізація технології виготовлення ММП, інтеграція обчислювальних алгоритмів дозволили реалізувати необхідну апаратно-програмну систему ультразвукового магнітострикційного неруйнівного контролю. Було розроблено алгоритм проведення експериментів, який спрямовано на визначення цілісності та структурної однорідності в тонкостінних зразках зі сталі та зварних з'єднань, експериментів з визначення порогів чутливості на зразках із локальними

дефектами. Був проведений порівняльний аналіз результатів експериментальних досліджень неруйнівного ультразвукового контролю з використанням ММП та методу радіографічного контролю.

У **першому** розділі дисертаційної роботи здійснено комплексний аналіз методів ультразвукового неруйнівного контролю на базі ультразвукових магнітострикційних ефектів. Зазначені тенденції розвитку ультразвукового неруйнівного контролю, наведено класифікацію методів. Представлено систематизований огляд сучасних засобів ультразвукового неруйнівного контролю. Наведені детальні порівняльні характеристики, що дозволяють визначити оптимальні сфери застосування конкретних приладів. Проведений аналіз сильних сторін та функціональних обмежень розглянутих засобів, що забезпечує обґрунтоване підґрунтя для вибору методології контролю залежно від специфіки об'єктів дослідження.

Описана фізична природа та надано математичний опис явища магнітострикції. Проведено аналітичне дослідження магнітострикційних ефектів та особливостей їх застосування. Оцінено науковий доробок провідних закордонних учених, чиї фундаментальні праці визначили вектори розвитку магнітострикційного контролю. Надано класифікацію магнітострикційних ефектів та їх практичне використання.

Розглянуті стан та тенденції розвитку ультразвукового магнітострикційного методу неруйнівного контролю, які аргументують пріоритетність розвитку напряму дослідження та провадження ультразвукового контролю з використанням магнітострикційних ефектів порівняно з класичними п'єзоелектричними методами за певних умов експлуатації. Як об'єкт дослідження розглядались елементи енергетичного обладнання. Наведені статистичні дані тонкостінних елементів, які найчастіше зустрічаються в енергетичному обладнанні і які потребують регулярного контролю. Разом з описом специфіки елементів контролю наведені труднощі реалізації, які виникають при ультразвуковому контролі елементів енергетичного обладнання. Описана класифікація дефектів в елементах енергетичного обладнання. На

основі аналізу специфіки елементів контролю та особливості реалізації задач контролю виконана постановка задач дослідження.

У другому розділі дисертаційної роботи наведено теоретичне обґрунтування та описані шляхи вдосконалення методу ультразвукового магнітострикційного неруйнівного контролю. У розділі проаналізовані фактори впливу при неруйнівному ультразвуковому контролі з використанням ММП. Побудована діаграма факторів впливу на достовірність неруйнівного ультразвукового контролю з використанням малоапертурних магнітострикційних перетворювачів. Зазначені особливості формування сигналів в акустичному тракті засобу УЗНК з ММП, надана класифікація пружних хвиль та вибраний найбільш прийнятний для використання в системах УЗНК з ММП метод. Розглянуті методи проходження, які доцільно застосовувати в УЗНК, орієнтованому на використання ММП. Описані основні етапи формування та опрацювання сигналів ММП.

В розділі були змодельовані процеси генерування сигналів ММП в електроакустичних трактах засобів ультразвукового контролю, які після аналітичної обробки даних дають можливість зробити висновки про амплітудні та часові характеристики сигналу. Виконані розроблення та дослідження методу оцінювання інформативних параметрів сигналів ММП на основі ДПГ, що по-перше, дає змогу відслідкувати динаміку зміни характеристик сигналу ММП, по-друге дає можливість застосувати відповідні детерміновані та статистичні методи опрацювання цих функцій, що необхідно для зменшення впливу шумової складової на точність їх визначення.

Також були змодельовані процеси опрацювання сигналів ММП та оцінювання їх інформативних параметрів, які дають можливість отримати вибірки інформаційних характеристик сигналів ММП. В розділі були розроблені вимоги до структури апаратних та програмних засобів ультразвукового магнітострикційного УЗНК. Сформульовані вимоги до структури апаратних та програмних засобів ультразвукового магнітострикційного УЗНК, математична модель формування акустичних сигналів, розгляд задачі оцінювання

інформаційних характеристик сигналів ММП надали можливість для обґрунтованого визначення застосування статистичних методів опрацювання необхідного для реалізації проведення експериментальних досліджень.

У **третьому** розділі дисертаційної роботи описана апаратно-програмна реалізація системи ультразвукового магнітострикційного неруйнівного контролю. Розроблена структура апаратних засобів ультразвукового магнітострикційного неруйнівного контролю з ММП. Розроблені програмні засоби ультразвукового магнітострикційного неруйнівного контролю з ММП в яких реалізовано різні режими дослідження які дають змогу автоматизувати процес дослідження властивостей різних матеріалів і характерних особливостей ММП.

Вибрана платформа для реалізації обчислювальних алгоритмів у вигляді прикладного програмного середовища LabVIEW фірми National Instruments. Описана структура віртуального пристрою, яка демонструє модульний підхід, де кожен функціональний блок виконує чітко визначену задачу. Виконаний опис основних програмних модулів, ключових особливостей реалізації та методики дослідження. Розроблений інтерфейс користувача для УЗНК з ММП. Описана реалізація алгоритму частотної фільтрації.

Обґрунтовані вимоги та реалізація конструкцій ММП випромінювача та приймача. Описані етапи технології виготовлення малоапертурних магнітострикційних перетворювачів. Сформульовані вимоги до ММП підтвердили реалізацію технології виготовлення ММП та наряду з реалізованим апаратно-програмним комплексом та реалізацією значної частини функцій обчислювальних алгоритмів дозволили визначитись з необхідною апаратно-програмною реалізацією системи ультразвукового магнітострикційного неруйнівного контролю.

У **четвертому** розділі дисертаційної роботи описані експериментальні дослідження ефективності алгоритмів магнітострикційного контролю. Описана методика проведення експериментальних досліджень ультразвукового контролю з використанням ММП. Вперше було розроблено алгоритм проведення

експериментів, який спрямовано на визначення цілісності та структурної однорідності в тонкостінних зразках зі сталі та зварних з'єднань.

Були проведені та описані дослідження з визначення часу затримки сигналів в ММП з оцінювання відтворюваності ММП-сигналів в умовах структурної однорідності матеріалу, з визначення амплітудно-часових залежностей ММП-сигналів від геометричних параметрів об'єкта контролю, з визначення порогів чутливості на зразках із локальними дефектами для методу ультразвукового магнітострикційного неруйнівного контролю. Була проведена та описана апробація розробленого алгоритму при контролі зварних з'єднань різного ступеня обробки. Був проведений порівняльний аналіз результатів експериментальних досліджень неруйнівного ультразвукового контролю з використанням ММП та методу радіографічного контролю. При проведенні досліджень були визначені параметри проходження імпульсу: часу затримки та амплітуди сигналу. Було встановлено час затримки в перетворювачах, підтверджена відтворюваність ММП-сигналів в ізотропному середовищі, зафіксована чітка залежність амплітуди виміряного сигналу від товщини зразка, виявлено залежність амплітуди виміряного сигналу від діаметру отвору, доведено, що метод ММП у поєднанні з програмним опрацюванням дозволяє чітко диференціювати бездефектні ділянки зварного шва та місця в яких в зварному шві наявні дефекти за рівнем згасання амплітуди ультразвукових хвиль, встановлений збіг результатів радіографічного контролю зразку згідно ДСТУ EN ISO 17636-2:2014 та результатів неруйнівного контролю ультразвукового контролю з використанням ММП. Завдяки проведеним експериментальним дослідженням була показана ефективність реалізації інформаційно-вимірювальної системи.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Отримала подальший розвиток математична модель сигналів магнітострикційного перетворювача в частині врахування геометричних розмірів електричних котушок, що дозволило виявити амплітудно-часові

особливості радіоімпульсних сигналів та на цій основі підвищити точність вимірювання їх часових затримок при поширенні у вимірювальному тракті.

2. Дістав подальшого розвитку метод оцінювання інформативних параметрів сигналів амплітуди та затримки на основі дискретного перетворення Гілберта, встановлено особливість впливу кінцевих розмірів котушки ММП на форму ультразвукового сигналу, яке супроводжується деформацією обвідної та додатковою затримкою сигналу магнітострикційного перетворювача відносно сигналу збудження.

3. Дістав подальшого розвитку метод магнітострикційного неруйнівного контролю, що базується на вдосконаленні науково-практичних засад створення перетворювачів, впровадження методології визначення інформативних сигналів на основі дискретного перетворення Гілберта та застосуванні концепції віртуальних інструментів, це в сукупності розширило функціональні можливості та автоматизувало процес опрацювання вимірювальної інформації та прийняття рішень.

Практичне значення

Розроблено апаратно-програмний модуль у вигляді віртуального приладу, який включає алгоритм фільтрації, визначення інформаційних параметрів сигналу та архівації даних, що дає змогу автоматизувати процес діагностики, скоротити час опрацювання експериментальних даних та отримання результатів контролю.

Обґрунтовано конструктивні особливості ММП-перетворювачів, зокрема вибір сплаву 49КФ для хвилеводу та конструктивні параметри двосекційної обмотки котушок. Це дало змогу реалізувати режим випромінювання та прийому ультразвукових коливань зі значним пригніченням шуму та збільшенням амплітуди корисного сигналу, що в сукупності підвищує відношення сигнал/шум.

Практичне підтвердження можливості використання ультразвукового магнітострикційного методу контролю в задачах контролю елементів обладнання, які включають зварні з'єднання, засвідчує збіг результатів,

отриманих за допомогою стандартизованого радіографічного контролю згідно з ДСТУ EN ISO 17636-2:2014.

Ключові слова: акустичне поле, акустичне випромінювання, спектральний розподіл, аналіз шуму, діагностика та контроль, моніторинг, інформаційно-вимірювальна система, спектральний аналіз, акустичний шум, виявлення дефектів, зашумлені дані, інформаційна система, перетворення Гільберта, інформативні параметри, математична модель, технічна діагностика, акустичний контроль

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Бабак В.П., Богачев І.В., Декуша О.Л., Ковтун С.І., Куц Ю.В., Созонов С.В. (2025) Дослідження ультразвукового магнітострикційного методу ультразвукового контролю. Частина 1. Застосування магнітострикційних ефектів у системах вимірювання та неруйнівного контролю. Технічна діагностика та неруйнівний контроль № 3, (2025), с.5-14. <https://doi.org/10.37434/tdnk2025.03.01> (фахове видання, категорія Б, ISSN 3041-2366)
2. Bohachev I., Kozyr O., Sozonov S. Redusing the influence of noise on the fccuracy of ulyras0nic pulse onset detection. System Research in Energy, 1 (81) (2025) <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.085> (фахове видання, категорія Б, ISSN 2786-7102)
3. Bohachev, I., Kozyr, O., Sozonov, S., Zaporozhets, A. (2025). Impulse Start Detection Algorithm to Automate Magnetostrictive Sensor Data Analysis for Quality Control Devices. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds)/ In: Systems, Decision and Control in Energy VII. Studies in Systems, Decision and Control, vol 595. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90466-0_8 (Scopus, ISSN: 21984182)
4. Ihor, B., Kozyr, O., Stanislav, S., Maryna, C. (2025). Virtual Device for Analysis of Measurement Data by Magnetostrictive Method. In: Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1659. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-06832-3_20 (Scopus, ISSN: 23673370)
5. Бабак В.П., Богачев І.В., Ковтун С.І., Созонов С.В., Хайдуров В.В. Патент на винахід №129684, Україна, МПК (2022.01) G01H 11/04 (2006.01), G01H 5/00 (2006.01), G01N29/24 (2006.01), B06B1/08, G01N29/14 (2006.1)

Малоапертурний магнітострикційний сенсор; заявл. 02.02.2023, опубл. 02.07.2025. Бюл. № 27/2025. **(Патент на винахід)**

6. Bohachev I., Kovtun S., Kuts Y., Sozonov S., Khaidurov V. (2023). Enhanced phase method of signal detection for ultrasonic magnetostriction defectoscopy of power equipment. *System Research in Energy*, 2 (73), 72-82, <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.072> , *(фахове видання, категорія Б, ISSN 2786-7102)*.
7. Kovtun S., Bohachev I., Dekusha O., Kuts Y., Kozyr O., Sozonov S. (2025) Experimental research of the magnetostrictive method of ultrasonic nondestructive testing. *International Journal NDT Days (NDT Days 2025)*, 8(2), 70-76. *(Закордонне фахове видання, ISSN: 2603-4018.)*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Созонов С. В., Богачев І. В., Декуша О. Л., Куц Ю. В. Вдосконалення методу аналізу даних вимірювань примагнітострикційному неруйнівному контролю об'єктів енергетики. XXVI Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювальна енергетика та енергоефективність у XXI столітті» ,м.Київ, 23 травня 2025р.
9. Созонов С. В., Ковтун С. В., Богачев І. В., Декуша О. Л., Куц Ю. В. Розвиток методу аналізу даних ультразвукового контролю на основі магнітострикційних ефектів. III Міжнародна науково-практична конференція «Цифрові технології в енергетиці і автоматизації», м. Київ, 06 червня 2025р.
10. Созонов С. В., Ковтун С. В., Богачев І. В., Декуша О. Л., Куц Ю. В. Дослідження магнітострикційного методу ультразвукового контролю, Міжнародний промисловий форум, м. Київ, 28 травня 2025р.
11. Богачев І.В., Козир О.В., Созонов С. В. (2024) Ультразвуковий контроль елементів енергетичного обладнання з використанням магнітострикційного ефекту. Збірка наукових праць “Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку” XX міжнародна науково-практична конференція, 159-162. <http://www.ceti-nasu.org.ua/upload/iblock/a50/a5008dee54a49d3f206562a657d51f69.pdf>
12. Созонов С.В. (2023). Спосіб виявлення сигналів магнітострикційної дефектоскопії при контролі елементів енергетичного обладнання. Збірник праць XIX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні”, 309-311 https://konfpbf.kpi.ua/new_imef_conf/wp-content/uploads/2025/01/Збірник-праць_EAIPPI_2023_ПОЛЯ_v2.pdf

ABSTRACT

Sozonov S. V. Improvement of the ultrasonic magnetostrictive method for testing power equipment components. – Qualifying scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 175 – Information and Measurement Technologies, Field of Knowledge 17 – Electronics, Automation, and Electronic Communications. – Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation solves the current scientific and technical problem of improving ultrasonic testing of power equipment elements using low-aperture magnetostrictive transducers (MMP). A comprehensive analysis of ultrasonic non-destructive testing (NDT) methods based on ultrasonic magnetostrictive effects have been conducted. The implementation difficulties that arise during ultrasonic testing of power equipment elements are described and a classification of defects is provided. The main stages of formation and processing of MMP signals are presented and the processes of generation of MMP signals in the electroacoustic paths of ultrasonic testing equipment are modeled. Furthermore, the processes of MMP signal processing and the estimation of their informative parameters have been modeled, enabling the acquisition of samples of the information characteristics of MMP signals. A user interface for ultrasonic system with MMP has been developed and the implementation of a frequency filtering algorithm has been described. The use of a hardware-software complex, the implementation of MMP manufacturing technology, and the integration of computational algorithms have made it possible to implement the necessary hardware-software system for ultrasonic magnetostrictive non-destructive testing. An algorithm has been developed for conducting experiments aimed at determining the integrity and structural homogeneity of thin-walled steel samples and welded joints, and experiments to determine sensitivity thresholds on samples with local defects. A comparative analysis has been conducted between the results of experimental research on non-destructive ultrasonic testing using MMP and the radiographic testing method.

In the first chapter of the dissertation, a comprehensive analysis of ultrasonic non-destructive testing (NDT) methods based on ultrasonic magnetostrictive effects has been conducted. Trends in the development of ultrasonic NDT are identified, and a classification of methods is provided. A systematized overview of modern ultrasonic NDT tools is presented. Detailed comparative characteristics are provided to help determine the optimal areas of application for specific devices. An analysis of the strengths and functional limitations of the considered tools is performed, providing a sound basis for selecting a control methodology depending on the specifics of the research objects.

The physical nature of the magnetostriction phenomenon has been described, and its mathematical description has been provided. An analytical study of magnetostrictive effects and the specifics of their application have been carried out. The scientific contributions of leading foreign scientists, whose fundamental works defined the development vectors of magnetostrictive testing, have been evaluated. A classification of magnetostrictive effects and their practical use have been provided.

The state and development trends of the ultrasonic magnetostrictive NDT method are considered, which justify the priority of the development of the research direction and implementing ultrasonic testing using magnetostrictive effects in comparison with classical piezoelectric methods under certain operating conditions. Power equipment components were considered as the object of research. Statistical data are provided for the thin-walled elements most commonly found in power equipment that require regular inspection. Along with a description of the specifics of the tested elements, the implementation difficulties arising during the ultrasonic testing of power equipment components are presented. A classification of defects in power equipment components is described. Based on the analysis of the specifics of control elements and the peculiarities of implementing control tasks, the research objectives have been formulated.

The second chapter of the dissertation provides a theoretical basis and describes ways to improve the method of ultrasonic magnetostrictive non-destructive testing. The chapter analyzes the factors of influence during non-destructive ultrasonic testing using MMP. A diagram of factors influencing the reliability of ultrasonic non-destructive testing using low-aperture magnetostrictive transducers has been constructed. The features of signal formation in the acoustic path of the ultrasonic scanning system (with MMP have been indicated, a classification of elastic waves has been provided, and the most suitable method for use in NDT systems with MMP have been selected. Transmission methods appropriate for use in MMP-oriented NDT are considered. The main stages of MMP signal formation and processing are described.

In this chapter, the processes of generation MMP signals in the electroacoustic paths of ultrasonic testing equipment have been modeled, which, after analytical data processing, allow conclusions to be drawn about the amplitude and temporal characteristics of the signal. Research and development have been carried out on a method for estimating the informative parameters of MMP signals based on DHT (Discrete Hilbert Transform). This, firstly, enables tracking the dynamics of changes in MMP signal characteristics and, secondly, it allows the application of appropriate deterministic and statistical methods for processing these functions, which is necessary to reduce the impact of the noise component on the accuracy of their determination.

Additionally, the processes of MMP signal processing and the estimation of their informative parameters have been modeled, making it possible to obtain samples of the information characteristics of MMP signals.

The chapter develops requirements for the hardware and software architecture of the ultrasonic magnetostrictive NDT. The requirements formulated for the hardware and software structure, the mathematical model of acoustic signal formation, and the consideration of the task of estimating the information characteristics of MMP signals provided a reasoned basis for determining the application of statistical processing methods necessary for conducting experimental studies.

The third chapter of the dissertation describes the hardware and software implementation of the ultrasonic magnetostrictive non-destructive testing system. The

hardware structure for ultrasonic magnetostrictive NDT with MMP has been developed. Software tools for ultrasonic magnetostrictive NDT with MMP have been designed, implementing various research modes that allow for the automation of the process of researching the properties of different materials and the characteristic features of MMP.

The platform chosen for implementing the computational algorithms is the LabVIEW software application environment from National Instruments. The structure of the virtual instrument has been described, demonstrating a modular approach where each functional block performs a clearly defined task. A description of the main software modules, key implementation features, and research methodology have been provided. A user interface for NDT with MMP has been developed, and the implementation of the frequency filtering algorithm has been described.

The requirements and the implementation of the MMP transmitter/emitter and receiver designs have been substantiated. The stages of the manufacturing technology for low-aperture magnetostrictive transducers have been detailed. The formulated requirements for MMP confirmed the implementation of MMP manufacturing technology and along with the developed hardware-software complex and the realization of a significant portion of the computational algorithm functions, made it possible to determine the necessary hardware and software implementation of the ultrasonic magnetostrictive non-destructive testing system.

The fourth chapter of the dissertation describes experimental studies on the effectiveness of magnetostrictive testing algorithms. The methodology for conducting experimental research on ultrasonic testing using MMP has been detailed. For the first time, an experimental algorithm has been developed to determine the integrity and structural homogeneity of thin-walled steel samples and welded joints.

Studies have been conducted and described regarding the determination of signal delay time in MMP, the evaluation of MMP signal reproducibility under conditions of material structural homogeneity, and the determination of amplitude-time dependencies of MMP signals on the geometric parameters of the test object. Additionally, sensitivity thresholds have been determined on samples with local

defects for the ultrasonic magnetostrictive non-destructive testing method. The testing of the developed algorithm have been carried out and described for the inspection of welded joints with varying degrees of processing.

A comparative analysis has been performed between the results of experimental research using MMP and the radiographic testing method. During the research, the parameters of the pulse transmission have been determined: delay time and signal amplitude. The delay time in the transducers has been determined, the reproducibility of MMP signals in an isotropic medium has been confirmed, and a clear dependence of the measured signal amplitude on the sample thickness has been recorded. Furthermore, a clear dependence of the measured signal amplitude on the hole diameter has been identified. It has been proven that the MMP method, combined with software processing, allows for the clear differentiation between defect-free weld seam divisions and places where defects are present in the weld seam based on the attenuation level of ultrasonic wave amplitude. The results obtained via MMP ultrasonic testing have been found to be consistent with radiographic testing results according to ISO 17636-2:2014. The experimental studies have demonstrated the effective implementation of the information-measurement system.

Scientific Novelty of the Obtained Results:

1. The mathematical model of magnetostrictive transducer signals has been further developed by incorporating the geometric dimensions of electric coils. This allowed us to identify the amplitude-temporal characteristics of radio pulse signals and consequently, increase the accuracy of measuring their time delays during propagation in the measuring path.

2. The method for estimating the informative signal parameters (amplitude and delay) based on the Discrete Hilbert Transform (DHT) have been further developed. The study has established the specific influence of finite MMP coil sizes on the ultrasonic signal shape, which is accompanied by deformation of the bypass and additional delay of the magnetostrictive transducer signal relative to the excitation signal.

3. The magnetostrictive non-destructive testing method has been further developed, based on the improvement of scientific and practical foundations for the creation of converters, the introduction of a methodology for determining informative signals based on the discrete Gilbert transform and the use of the virtual instrument concept. Collectively, this have expanded the functional capabilities of the magnetostrictive non-destructive testing method and automated the processing of measurement information and decision-making.

Practical Significance:

A hardware-software module has been developed in the form of a virtual instrument, which includes algorithms for filtering, determining informative signal parameters, and data archiving. This enables the automation of the diagnostic process, reducing the time required for experimental data processing and obtaining results of control.

The design features of MMP transducers have been substantiated, specifically the selection of 49KF alloy for the waveguide and the design parameters of the two-section coil winding. This allowed for the implementation of ultrasonic oscillation emission and reception modes with significant noise suppression and increased useful signal amplitude, overall improving the signal-to-noise ratio.

Practical confirmation of the feasibility of using the ultrasonic magnetostrictive testing method for inspecting equipment components, including welded joints, was achieved. The results show a high correlation with standardized radiographic testing according to DSTU EN ISO 17636-2:2014.

Key words: magnetostrictive effects, small-aperture magnetostrictive transducers, defects in power engineering equipment elements, amplitude-time dependencies of MMP signals acoustic field, acoustic radiation, spectral distribution, noise analysis, diagnostics and control, monitoring, information and measurement system, diagnostics and control, monitoring, spectrum analysis, acoustic noise, defect detection, noisy data, diagnostics, information system, control, Hilbert transform, informative parameters, mathematical model, technical diagnostics, acoustic control, technical diagnostics.

Scientific publications reflecting the main scientific results of the dissertation:

1. Babak, V. P., Bohachev, I. V., Dekusha, O. L., Kovtun, S. I., Kuts, Y. V., & Sozonov, S. V. (2025). Research of the ultrasonic magnetostrictive method of ultrasonic testing. Part 1. Application of magnetostrictive effects in measurement and non-destructive testing systems. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, (3), 5-14. <https://doi.org/10.37434/tdnk2025.03.01> (Professional publication, Category B).
2. Bohachev, I., Kozyr, O., & Sozonov, S. (2025). Reducing the influence of noise on the accuracy of ultrasonic pulse onset detection. *System Research in Energy*, 1(81). <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.085> (Professional publication, Category B).
3. Bohachev, I., Kozyr, O., Sozonov, S., & Zaporozhets, A. (2025). Impulse Start Detection Algorithm to Automate Magnetostrictive Sensor Data Analysis for Quality Control Devices. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds). *Systems, Decision and Control in Energy VII. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 595. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90466-0_8 (**Scopus**).
4. Ihor, B., Kozyr, O., Stanislav, S., & Maryna, C. (2025). Virtual Device for Analysis of Measurement Data by Magnetostrictive Method. In: *Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2024. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 1659. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-06832-3_20 (**Scopus**).
5. Babak, V. P., Bohachev, I. V., Kovtun, S. I., Sozonov, S. V., & Khaidurov, V. V. (2025). *Low-aperture magnetostrictive sensor*. Patent of Ukraine for invention No. 129684. Bull. No. 27/2025.
6. Bohachev, I., Kovtun, S., Kuts, Y., Sozonov, S., & Khaidurov, V. (2023). Enhanced phase method of signal detection for ultrasonic magnetostriction defectoscopy of power equipment. *System Research in Energy*, 2(73), 72-82. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.072> (Professional publication, Category B).
7. Kovtun, S., Bohachev, I., Dekusha, O., Kuts, Y., Kozyr, O., & Sozonov, S. (2025). Experimental research of the magnetostrictive method of ultrasonic non-destructive testing. *International Journal NDT Days*, 8(2), 70-76. (Foreign professional publication).

Scientific publications confirming the approbation of the dissertation materials:

8. Sozonov, S. V., Bohachev, I. V., Dekusha, O. L., & Kuts, Y. V. (2025). Improving the measurement data analysis method for magnetostrictive non-destructive testing of power facilities. *XXVI International Scientific and Practical Conference "Renewable Energy and Energy Efficiency in the XXI Century"*, Kyiv, May 23, 2025.

9. Sozonov, S. V., Kovtun, S. V., Bohachev, I. V., Dekusha, O. L., & Kuts, Y. V. (2025). Development of a data analysis method for ultrasonic testing based on magnetostrictive effects. *III International Scientific and Practical Conference "Digital Technologies in Energy and Automation"*, Kyiv, June 06, 2025.
10. Sozonov, S. V., Kovtun, S. V., Bohachev, I. V., Dekusha, O. L., & Kuts, Y. V. (2025). Research of the magnetostrictive method of ultrasonic testing. *International Industrial Forum*, Kyiv, May 28, 2025.
11. Bohachev, I. V., Kozyr, O. V., & Sozonov, S. V. (2024). Ultrasonic testing of power equipment elements using the magnetostrictive effect. *Collection of Scientific Papers "Thermal Power Engineering: Ways of Renovation and Development"*, XX International Scientific and Practical Conference, 159-162. doi.org.
12. Sozonov, S. V. (2023). A method for detecting magnetostrictive defectoscopy signals during the inspection of power equipment elements. *Proceedings of the XIX All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, and Young Scientists "Efficiency and Automation of Engineering Solutions in Instrument Making"*, 309-311. Kyiv, December 20-21, 2023.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	21
ВСТУП.....	26
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ НА БАЗІ УЛЬТРАЗВУКОВИХ МАГНІТОСТРИКЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ	34
1.1 Класифікація та тенденції розвитку методів та засобів ультразвукового неруйнівного контролю	34
1.2 Аналітичне дослідження магнітострикційних ефектів та особливостей їх застосування.....	40
1.3 Стан та тенденції розвитку ультразвукового магнітострикційного методу неруйнівного контролю	45
1.4. Аналіз елементів енергетичного обладнання як об'єктів ультразвукового неруйнівного контролю.....	57
1.5 Висновки до розділу 1.....	62
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МАГНІТОСТРИКЦІЙНОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ	64
2.1. Аналіз факторів впливу при неруйнівному ультразвуковому контролі з використанням ММП.....	64
2.2 Особливості формування сигналів в акустичному тракті засобу УЗНК з ММП.....	66
2.3 Моделювання процесів генерування сигналів ММП в електроакустичних трактах засобів ультразвукового контролю	73
2.4 Розроблення та дослідження методу оцінювання інформативних параметрів сигналів ММП на основі ДПГ.....	77
2.5 Моделювання процесів опрацювання сигналів ММП та оцінювання їх інформативних параметрів	79

2.6	Анліз швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль в пластині при використанні магнітострикційного УЗНК.....	82
2.7	Розроблення вимог до структури апаратних та програмних засобів ультразвукового магнітострикційного УЗНК.....	87
2.8	Висновки до розділу 2	88
РОЗДІЛ 3. АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МАГНІОСТРИКЦІЙНОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ		
3.1.	Розроблення структури апаратних засобів ультразвукового магнітострикційного неруйнівного контролю з ММП.....	90
3.2.	Розроблення програмних засобів ультразвукового магнітострикційного неруйнівного контролю з ММП	92
3.3.	Розроблення інтерфейсу користувача для УЗНК з ММП.....	100
3.4.	Обґрунтування вимог та реалізація конструкції ММП випромінювача та приймача	106
3.5	Висновки до розділу 3.....	112
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ МАГНІОСТРИКЦІЙНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ.....		
4.1	Алгоритм проведення експериментальних досліджень ультразвукового контролю з використанням ММП.....	114
4.2	Експериментальне визначення часу затримки сигналів в ММП.....	118
4.3	Експериментальне оцінювання відтворюваності ММП-сигналів в умовах структурної однорідності матеріалу	120
4.4	Експериментальне визначення амплітудно-часових залежностей ММП-сигналів від геометричних параметрів об'єкта контролю	124
4.5	Визначення порогів чутливості на зразках із локальними дефектами для методу ультразвукового магнітострикційного неруйнівного контролю	

4.6 Визначення швидкості розповсюдження ультразвукового сигналу в зразках з різною товщиною для методу ультразвукового магнітострикційного неруйнівного контролю.....	131
4.6 Апробація розробленого алгоритму при контролі зварних з'єднань різного ступеня обробки.....	135
4.7 Порівняльний аналіз результатів експериментальних досліджень неруйнівного ультразвукового контролю з використанням ММП та методу радіографічного контролю	138
4.8 Висновки до розділу 4	141
ВИСНОВКИ	143
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	145
ДОДАТОК А.....	160
ДОДАТОК Б	163
ДОДАТОК В	166
ДОДАТОК Г	170

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

- ММП - Малоапературний магнітострікційний перетворювач;
 УЗНК - Ультразвуковий неруйнівний контроль;
 НК - неруйнівний контроль;
 ОК – Об’єкт контролю;
 ДТМ - Дзеркально-тіньовий метод;
 ЗІ – зонduючий імпульс;
 ДІ – донний імпульс;
 ДПГ - дискретне перетворення Гільберта;
 МСП - магнітострикційний перетворювач;
 МСС - магнітострикційних сенсорів
 ПЕП - п'єзоелектричні перетворювачі;
 ПНТ - підігрівачі низького тиску;
 ПТО - пластинчасті теплообмінники;
 ПП – підсилювач потужності;
 АЦП - аналого-цифровий перетворювач;
 ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;
 МПОС – модуль первинного оброблення сигналів;
 МГЦОС – модуль генерації та цифрового опрацювання сигналів;
 ПК – персональний комп'ютер;
 ПЗ - програмного забезпечення;
 ВП - віртуальні прилади;
 ФП - фронтальні панелі;
 е.р.с. - електро рушійна сила
 sol - масив призначений для зберігання повної часової історії розв'язку;
 Solver – функція реалізує чисельний метод знаходження поля на новому часовому шарі;

Signal - масив який містить часові реалізації сигналів у контрольних точках, заданих масивом *Pos*;

surf – функція створення анімованого графіка поширення хвилі;

SH-хвиль - горизонтально поляризовані поперечні хвилі;

SH0 - низькочастотні горизонтально поляризовані хвилі;

MsS — Magnetostrictive Sensors;

MDL – magnetostrictive delay line;

SH - Shear Horizontal waves;

ЗІ – зонduючий імпульс;

ДІ – донний імпульс;

ГЗС – генератор зонduючих імпульсів;

ЕТ –електронний тракт;

ММП1 – випромінюючий перетворювач;

ММП2 – приймаючий перетворювач;

γ – коефіцієнт лінійної магнітострикції;

ΔL — абсолютна зміна довжини;

L — початкова довжина об'єкта;

f – частоти коливання, Гц;

c - швидкість хвиль, м/с;

U - напруга, В;

T – період сигналу-носія, секунди;

$I(\tau)$ – індикаторна функція;

$\lambda_{\square}$ – довжина хвилі, мм;

J – обсяг вибірки;

A - Відносна амплітуда сигналу;

h – товщина пластини;

c_t - швидкість поперечних хвиль;

c_l - швидкість поздовжніх хвиль;

c_R – співвідношення c_R/c_t ;

c_{Ns_0} - швидкості хвиль Лемба симетричних нульового порядку;

τ_1 - час затримки;

hm - відстань між ММП;

$K_{e.a.t}$ – коефіцієнт електроакустичного тракту;

$\vec{p}$ – вектор параметрів дефекту;

U_B – амплітуда напруги на випромінювачі;

U_{II} – амплітуда напруги на приймачі;

$K_{пп}$ – коефіцієнт подвійного електромеханічного зв'язку;

$K_{ат}$ – коефіцієнт акустичного тракту;

$u_{мп}(t)$ модель електричних сигналів на виході ММП-приймача;

τ – затримка випроміненого сигналу $u_e(t)$ в електроакустичному тракті;

$uA_B(t)$ - сигнал збудження;

$\xi(t)$ – реалізація адитивного гауссового шуму з нульовим математичним сподіванням та дисперсією σ^2 ;

T_a – час аналізу сигналу;

φ_c – зсув фази, що обумовлений затримкою сигналу;

$(A(\cdot))$ – обвідна вузькосмугового сигналу;

$(\Phi(\cdot))$ – фаза вузькосмугового сигналу;

$\varphi(t) \in 0,2\pi$ – модуляційна складова фази вузькосмугового сигналу, викликана дією шуму;

$u(t, \tau)$ – сигнал збудження;

T – період сигналу-носія;

$K_{мп}$ – коефіцієнт перетворення напруги в деформацію $d(t)$

$I(\tau)$ – індикаторна функція;

$[\square]^+$ – позначення операції виділення цілого числа;

T_d – період дискретизації аналогового сигналу;

j – номер відліку у вибірці;

L – оператор розгортання фазової характеристики сигналу за межі інтервалу $-0,5\pi, 0,5\pi,)$;

σ – середнє квадратичне значення гауссового шуму;

ρ_n – щільність;

c_l - швидкість поздовжньої хвилі;

E - модуль Юнга;

μ^* - відносна магнітна проникність;

H_c - коерцитивна сила;

θ - температура Кюри;

$\rho_{\text{ел}}$ - питомий електричний опір;

H_n - раціональне поле підмагнічування;

$\tilde{A}$ - середнє значення амплітуди;

A_{max} – значення максимальної амплітуди;

СКВ ($\tilde{\sigma}$)- середньоквадратичне відхилення;

P - довірна імовірність;

$\tilde{A}_{\text{ref}}$ - середня амплітуда референтної ділянки;

$u_B(\text{osc})$ - стандартна відносна невизначеність за типом В для осцилографа;

Δ_{osc} – розширена невизначеність відповідного приладу;

k_{osc} – коефіцієнт охоплення;

$u_B(\text{noise})$ - стандартна відносна невизначеність за типом В викликана присутніми у вимірювальному тракті шумами

Δ_{noise} – розширена невизначеність за типом В викликана адитивними у вимірювальному тракті шумами;

k_{noise} – коефіцієнт охоплення;

$u_B(\text{res. gen})$ - стандартна відносна невизначеність за типом В, обумовлена розрядністю ЦАП генератора;

$V_{\text{gen range}}$ – діапазон сигналів;

V_{nom} – номінальне значення сигналу;

bits – розрядність ЦАП генератора;

$u_B(NkMMP)$ - сумарна невизначеність за типом В при вимірюваннях при урахуванні незалежності складових;

$u_A(Aref)$ - стандартні невизначеності типу А, при багатократних вимірюваннях вхідних величин амплітуди на референсній ділянці контролю;

$u_A(Acont)$ - стандартні невизначеності типу А, при багатократних вимірюваннях вхідних величин амплітуди в зоні контролю;

A_n – значення вхідної величини при n -му вимірюванні;

$\bar{A}$ – усереднене значення вхідної величини;

N – кількість багатократних вимірювань;

$u_A(NkMMP)$ - невизначеність типу А вимірювань;

$u_C(NkMMP)$ - сумарна стандартна невизначеність вимірювань амплітудних характеристик;

$U(NkMMP)$ - розширена стандартна невизначеність результатів вимірювання;

$D(\delta_{NkMMP})$ - оцінка достовірності;

$\dot{z}_{мп}(t/\sigma)$ – аналітичний сигнал;

$\tilde{u}_{мп}(t/\sigma)$ – Гільберт-образ аналізованого сигналу $u_{мп}(t/\sigma)$;

t - поточний час моделювання;

T_{fin} - кінцевий час моделювання;

k – параметр визначає частоту збудження;

$H(z)$ – передавальна функція фільтра;

N_s – кількість фільтрів 2-го порядку;

$X(z)$ – z -перетворення вхідного сигналу;

$Y(z)$ – z -перетворення вихідного відфільтрованого сигналу;

B_s - індукція насичення;

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Забезпечення безпечної експлуатації елементів енергетичного обладнання, конструкцій, механізмів та поступове старіння обладнання, висуває вимоги до підвищення рівня контролю. Серед розповсюджених видів контролю провідне місце посідає ультразвуковий неруйнівний контроль (УЗНК). Це зумовлено його високою чутливістю, безпечністю та мобільністю. Методи та засоби УЗНК знаходять широке застосування для оцінювання якості виробів і конструкцій різного ступеня складності. Вони забезпечують безперервний моніторинг технічного стану об'єктів як на стадії виробництва, так і впродовж усього експлуатаційного циклу. Завдяки досягненням у сфері інформаційно-вимірювальних технологій, зокрема методам фазових вимірювань, штучного інтелекту та машинного навчання, можливості УЗНК суттєво розширилися, дозволяючи впроваджувати інноваційні технології моніторингу цивільної інфраструктури.

Вдосконалення УЗНК зумовлена низкою факторів, включаючи зростаючу складність геометрії об'єктів контролю (ОК), розширення екстремальних діапазонів їх робочих температур, посилення вимог до достовірності та відтворюваності результатів контролю, збільшення спектру використовуваних конструкційних матеріалів з різними акустичними властивостями, а також критична потреба в надійному виявленні дефектів в умовах значних акустичних завад та низького співвідношення сиг-нал/шум.

Останнім часом значна наукова увага зосереджена на вдосконаленні методів УЗНК, що ґрунтуються на магніто-стрикційних ефектах. Ці явища, що є результатом пружно-магнітної взаємодії в феромагнетиках (Fe, Ni, Co, Gd, Tb та їхніх сплавах), відкривають нові можливості для генерації та прийому ультразвукових хвиль. Зокрема, прямі магнітострикційні ефекти Джоуля та Відемана, а також зворотні до них ефекти Вілларі та Вертгейма.

Перспективним науково-технічним напрямом у розвитку УЗНК є активне впровадження малоапертурних магнітострикційних перетворювачів (ММП) .

Дослідження в цій області спрямовані на подолання обмежень, пов'язаних з низьким рівнем сигнал/шум, характерним для ММП, шляхом оптимізації конструкції перетворювачів, розробки нових методів збудження та приймання ультразвукових хвиль, а також застосування передових алгоритмів опрацювання сигналів для підвищення чутливості та роздільної здатності контролю.

Обрана тема дисертаційної роботи є актуальною, оскільки спрямована на вирішення важливої науково-прикладної задачі. Магнітострикційний метод ультразвукового контролю має ряд переваг, таких як можливість контролю об'єктів складної форми, при високих температурах, з сухим контактом та в умовах обмеженого доступу. Однак, особливості генерації та поширення ультразвукових хвиль магнітострикційними перетворювачами призводять до низького співвідношення сигнал/шум, що обмежує застосування методу. Метою даної роботи є вдосконалення методу аналізу даних системи ультразвукового контролю з малоапертурними магнітострикційними перетворювачами.

Вагомий внесок у дослідження магнітострикційного ефекту та аналіз перспектив його використання у неруйнівному контролі зробили закордонні вчені, зокрема: Chen, X., Cobb, A., Fisher, J., Vinogradov, S. (Sensor Systems and NDE Technology Department, Southwest Research Institute, San Antonio, TX, USA); Kim, Y. Y., Kwon, Y. E. (School of Mechanical and Aerospace Engineering and Institute of Advanced Machines and Design, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, Republic of Korea); Se-Beom Oh, Yong-Moo Cheong, Deok-Hyun Lee and Kyung-Mo Kim (Nuclear Materials Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute; Department of Materials Science and Engineering, Dankook University, Korea), Ekreem, N.B., Olabi, A.G., Prescott, T., Rafferty, A., Hashmi M.S.J., (School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Dublin City University, Ireland) та ін.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика та розділи цієї дисертаційної роботи входили до складу наукових робіт, які були виконані в Інституті загальної енергетики Національної академії наук України. Отримані результати досліджень здобувача увійшли до складу наукових робіт:

– науково-дослідна робота (№ 0123U100127) «Розвиток методів та засобів моніторингу стану довкілля об'єктів енергетики на базі бездротових сенсорних мереж» відповідно до тематичного плану науково-досліджень Інституту загальної енергетики НАН України.

Мета та завдання дослідження. Удосконалення ультразвукового магніто-стрикційного методу неруйнівного контролю за рахунок покращення метрологічних характеристик перетворювачів та опрацювання інформаційних сигналів

Для досягнення поставленої мети сформульовано науково-практична задача, що полягає в удосконаленні ультразвукового магніто-стрикційного методу неруйнівного контролю шляхом покращення метрологічних характеристик перетворювачів та вдосконалення методів опрацювання інформаційних сигналів.

Відповідно поставленої науково-практичної задачі в роботі вирішено такі завдання:

- Удосконалено математичну модель сигналів магнітострикційного перетворювача шляхом врахування геометричних розмірів електричних котушок для виявлення амплітудно-часових особливостей радіоімпульсних сигналів та підвищення точності вимірювання їх часових затримок у вимірювальному тракті;
- Удосконалено метод оцінювання інформативних параметрів сигналів на основі дискретного перетворення Гільберта з урахуванням особливостей впливу магнітострикційного перетворення на форму імпульсу;
- Удосконалено метод магнітострикційного неруйнівного контролю шляхом розвитку науково-практичних засад створення перетворювачів, впровадження методології опрацювання сигналів на основі дискретного перетворення Гільберта для розширення функціональних можливостей застосування;;

- Розроблено апаратно-програмний модуль з реалізацією алгоритмів фільтрації, визначення інформаційних параметрів та архівації даних для автоматизації процесу діагностики;
- Обґрунтовано конструктивні параметри магнітострикційних перетворювачів, зокрема вибір матеріалу хвилеводу та конфігурацію обмотки котушок;
- Удосконалено технологічні засади створення засобів магнітострикційного контролю для стабілізації енергетичних характеристик та мінімізації втрат при формуванні імпульсів;
- Проведено експериментальну перевірку ефективності магнітострикційного методу контролю та здійснено порівняльний аналіз отриманих результатів із даними стандартизованих методів

Об'єкт дослідження – Процес формування, поширення, перетворення сигналів та оцінювання їх інформаційних параметрів в магнітострикційному методі неруйнівного контролю.

Предмет дослідження – Апаратно-програмні засоби реалізації ультразвукового магнітострикційного методу неруйнівного контролю

Методи дослідження. У роботі використані такі наукові методи досліджень:

– Методи математичного і комп'ютерного моделювання — для розробки та реалізації уточненої моделі магнітострикційного перетворювача з урахуванням геометрії котушок, що дозволяє моделювати поширення радіоімпульсів та знаходити розв'язки рівнянь математичної фізики для опису електромагнітних полів у зоні контролю.

– Методи системного аналізу — для розроблення комплексної технології УЗНК, яка включає методику опрацювання сигналів на основі дискретного перетворення Гільберта, алгоритми фільтрації та методи оцінювання інформативних параметрів (амплітудно-часових характеристик) для виявлення дефектів у реальному часі.

- Методи цифрової обробки сигналів — для впровадження алгоритмів дискретного перетворення Гільберта з метою виділення обвідної радіоімпульсів, що забезпечує підвищення точності вимірювання часових затримок та стабілізацію енергетичних характеристик вимірювального тракту.
- Експериментальний метод — для проведення порівняльних досліджень ефективності розроблених магнітострикційних перетворювачів, визначення фізико-технічних характеристик хвилеводів та верифікації результатів контролю шляхом зіставлення з даними стандартних методів дефектоскопії.
- Статистичні методи — для аналізу результатів магнітострикційного контролю, оцінки достовірності виявлення дефектів (валідації) та визначення метрологічних характеристик розробленого апаратно-програмного модуля.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Отримала подальший розвиток математична модель сигналів магнітострикційного перетворювача в частині врахування геометричних розмірів електричних котушок, що дозволило виявити амплітудно-часові особливості радіоімпульсних сигналів та на цій основі підвищити точність вимірювання їх часових затримок при поширенні у вимірювальному тракті.
2. Дістав подальшого розвитку метод оцінювання інформативних параметрів сигналів амплітуди та затримки на основі дискретного перетворення Гільберта, встановлено особливість впливу кінцевих розмірів котушки ММП на форму ультразвукового сигналу, яке супроводжується деформацією обвідної та додатковою затримкою сигналу магнітострикційного перетворювача відносно сигналу збудження
3. Дістав подальшого розвитку метод магнітострикційного неруйнівного контролю, що базується на вдосконаленні науково-практичних засад створення перетворювачів, впровадження методології визначення інформативних сигналів на основі дискретного перетворення Гільберта та застосуванні концепції віртуальних інструментів, це в сукупності розширило функціональні можливості та автоматизувало процес опрацювання вимірювальної інформації та прийняття рішень.

Практичне значення

Розроблено апаратно-програмний модуль у вигляді віртуального приладу, який включає алгоритм фільтрації, визначення інформаційних параметрів сигналу та архівації даних, що дає змогу автоматизувати процес діагностики, скоротити час опрацювання експериментальних даних та отримання результатів контролю.

Обґрунтовано конструктивні особливості ММП-перетворювачів, зокрема вибір сплаву 49КФ для хвилеводу та конструктивні параметри двосекційної обмотки котушок. Це дало змогу реалізувати режим випромінювання та прийому ультразвукових коливань зі значним пригніченням шуму та збільшенням амплітуди корисного сигналу, що в сукупності підвищує відношення сигнал/шум.

Практичне підтвердження можливості використання ультразвукового магнітострикційного методу контролю в задачах контролю елементів обладнання, які включають зварні з'єднання, засвідчує збіг результатів, отриманих за допомогою стандартизованого радіографічного контролю згідно з ДСТУ EN ISO 17636-2:2014.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень представлені на міжнародних і всеукраїнських науково-технічних та науково-практичних конференціях, зокрема:

- XXVI Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювальна енергетика та енергоефективність у XXI столітті» м. Київ, 23 травня 2025р.;
- III Міжнародна науково-практична конференція «Цифрові технології в енергетиці і автоматичності» м. Київ, 06 червня 2025р.;
- Міжнародний промисловий форум, м. Київ, 28 травня 2025р.;
- ТЕПЛОВА ЕНЕРГЕТИКА:ШЛЯХИ РЕНОВАЦІЇ ТА РОЗВИТКУ XX Міжнародна науково-практична конференція м. Київ, 2024р.;

- XIX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні” 20-21 грудня 2023 р., м. Київ.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати, що виносяться на захист, отримані автором особисто на основі узагальнення результатів досліджень, проведених як індивідуально так і колективно. В дисертації не використовувались ідеї та розробки, що належать співавторам спільно опублікованих наукових праць.

У роботах, опублікованих у співавторстві, Созонову С.В. належить: Удосконалення математичних моделей та алгоритмів опрацювання сигналів — розроблення уточненої моделі магнітострикційного перетворювача з урахуванням геометрії котушок, розробка алгоритмів детектування імпульсів та методів зниження впливу шумів на точність вимірювання затримок [2, 3, 6, 12]; Розробка програмно-апаратних засобів та технологій контролю — обґрунтування структури та реалізація архітектури віртуального приладу для аналізу даних магнітострикційного контролю, розробка алгоритмів автоматизації діагностики в апаратно-програмних модулях [3, 4, 8];

Удосконалення конструкцій магнітострикційних сенсорів — обґрунтування конструктивних параметрів та участь у створенні малоапертурного магнітострикційного сенсора з покращеними енергетичними характеристиками [1, 5];

Проведення експериментальних досліджень та апробація методу — виконання експериментальних вимірювань, порівняльний аналіз результатів магнітострикційного методу з традиційними засобами УЗНК, верифікація ефективності розроблених засобів на об'єктах енергетики [7, 9, 10, 11].

Співавторам, які брали участь в написанні опублікованих роботах належать наступні внески :

Бабак В.П.: концептуалізація стратегії розвитку інформаційно-діагностичних систем та загальне кураторство науковими дослідженнями [1];

Куц Ю.В.: концептуалізація основних ідей дослідження, методологія статистичного опрацювання сигналів та верифікація ефективності запропонованих методів діагностики [1, 6, 7, 8, 9, 10];

Богачев І.В.: розробка апаратних засобів та проведення досліджень фізичних процесів, розробка методології побудови інформаційно-вимірювальних систем, методологія розробки експериментальних стендів [1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11];

Декуша О.Л.: обґрунтування методології вимірювань та концептуалізація загальної структури досліджень [1, 8, 9, 10];

Ковтун С.І.: обґрунтування методології інформаційно-вимірювальних систем [1, 6, 7];

Козир О.В.: розробка спеціалізованого програмного забезпечення для опрацювання даних [2, 3, 4, 7, 11];

Запорожець А.О.: аналіз можливості застосування методів ультразвукового контролю з використанням магнітострикційних перетворювачів для діагностики [3];

Хайдуров В.В.: розробка математичних моделей фізичних полів та процесів у досліджуваних об'єктах [6];

Чехаровська М.І.: підготовка даних для статистичного аналізу та систематизація результатів вимірювань [4]

Публікації. За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 12 наукових праць, серед яких 3 статті у наукових фахових виданнях України категорії Б, 1 стаття у закордонному фаховому виданні, 2 публікації у виданні, що проіндексовано у базі даних Scopus, 1 патент на винахід та 5 тез доповідей на міжнародних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел з 116 найменувань, 4 додатки та містить 64 рисунка та 11 таблиць. Загальний обсяг роботи складає 171 сторінок.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ НА БАЗІ УЛЬТРАЗВУКОВИХ МАГНІОСТРИКЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ

1.1 Класифікація та тенденції розвитку методів та засобів ультразвукового неруйнівного контролю

Забезпечення безпечної експлуатації елементів енергетичного обладнання, конструкцій, механізмів та поступове старіння обладнання, висуває вимоги до підвищення рівня контролю. Це стимулює пришвидшення досліджень у галузі неруйнівного контролю (НК) та моніторингу стану об'єктів [1]. На сьогодні НК охоплює широке коло методів і засобів [2-4], що базуються на використанні різних фізичних законів для отримання достовірної інформації про структурну цілісність критично важливих інженерних споруд [5-9], енергетичного обладнання [10-12], залізничних рейок [13], а також для контролю якості виробів адитивного виробництва [14-16]. Застосування сучасних інструментів інформаційно-вимірювальних технологій, що базується на фазових методах контролю [18-20] та інтелектуальному аналізі даних [21-25], зумовило розширення аналітичних можливостей контролю у різних сферах безпеки промислової інфраструктури в тому числі і в елементах енергетичного обладнання. На цій основі запропоновано сукупність інноваційних високотехнологічних технологій моніторингу та контролю, що інтегрують сучасні методи діагностування.

Серед розповсюджених видів діагностики провідне місце посідає ультразвуковий неруйнівний контроль (УЗНК) [1-3]. Це зумовлено його високою чутливістю, безпечністю та мобільністю. Методи та засоби ультразвукового неруйнівного контролю знаходять широке застосування для оцінювання якості виробів і конструкцій різного ступеня складності. Вони забезпечують безперервний моніторинг технічного стану об'єктів як на стадії виробництва, так і впродовж усього експлуатаційного циклу. Завдяки досягненням у сфері інформаційно-вимірювальних технологій [17], зокрема методам фазових вимірювань [18-20], штучного інтелекту [21-23] та машинного навчання [24, 25],

можливості УЗНК суттєво розширилися, дозволяючи впроваджувати інноваційні технології моніторингу цивільної інфраструктури.

Сучасні методи УЗНК класифікуються за декількома ключовими ознаками, що визначають взаємодію акустичного поля з об'єктом контролю (ОК) [87, 88].

За методом контролю, виділяють амплітудні (індикаторні) методи та методи візуалізації (інтроскопії).

В амплітудних методах інформація про наявність дефекту отримується шляхом аналізу амплітуди прийнятого сигналу та часу його приходу. Найчастіше використовується А-розгортка (графік залежності амплітуди від часу/відстані) [89]. Оператор робить висновок про дефект на основі перевищення сигналом певного порогу (чутливості).

Амплітудні методи:

- Ехо-імпульсний метод: реєстрація інтенсивності та часу затримки сигналу, відбитого від неоднорідності.

- Дзеркально-тіньовий метод (ДТМ): фіксація зменшення амплітуди сигналу, відбитого від протилежної грані (донного сигналу), через розсіювання на дефекті.

- Тіньовий метод: використання окремих випромінювача та приймача; дефект визначається за "звуковою тінню" (відсутністю сигналу).

- Луно-імпульсний метод вимірювання параметрів пружних коливань (імпульсів), що відбиваються від дефектів або границь розділу середовищ.

- Дифракційно-часовий метод: аналіз часу приходу хвиль, що дифрагують на верхній та нижній межах дефекту.

- Фазово-часові методи:

- Резонансний метод: базується на встановленні стоячих хвиль у виробі, що дозволяє вимірювати товщину стінок з високою точністю.

Особливість методів візуалізації полягає в формуванні двовимірного або тривимірного зображення внутрішньої структури об'єкта

Методи візуалізації:

- Метод фазованої решітки: електронне сканування променем під різними кутами без переміщення перетворювача.

- Метод загального фокусування: реконструкція внутрішньої структури ОК шляхом математичної обробки всіх можливих комбінацій сигналів від елементів решітки. Базується на реєстрації імпульсів відбитих від дефектів.

- Дзеркально-тіньовий метод: аналіз зміни амплітуди сигналу, відбитого від донної поверхні виробу.

- Дифракційно-часовий метод: реєстрація сигналів, що дифрагують на краях дефекту.

За типом використовуваних хвиль: застосування поздовжніх, поперечних, поверхневих хвиль Релея та нормальних хвиль або хвилі Лемба залежно від геометрії об'єкта.

За способом контакту:

Контактний (через шар мастила) та імерсійний (через шар води). Слід зазначити, що класичні п'єзоелектричні перетворювачі потребують стабільного акустичного контакту, а у разі необробленої поверхні ОК — її попередньої підготовки (наприклад, шліфування).

Безконтактний (лазерний ультразвук, ЕМА-метод), що дозволяє проводити контроль без підготовки поверхні.

За період розвитку УЗНК засоби реалізації та апаратне забезпечення еволюціонували від простих ультразвукових засобів контролю до складних роботизованих комплексів, що інтегруються в автоматизовані лінії виробництва. В таблиці 1.1 наведені основні типи засобів, які використовують при проведенні УЗНК на даний час.

На сучасному етапі розвитку УЗНК визначається трьома основними векторами: цифровізацією, автоматизацією та підвищенням роздільної здатності.

Перехід від класичних одноінструментальних перетворювачів до фазованих решіток забезпечив фокусування в кожній точці зображення, що радикально підвищує якість візуалізації дефектів складної форми.

Таблиця 1.1 Типи засобів для проведення УЗНК

Тип засобів	Характеристики	Сфера застосування
Портативні ультразвукові засоби контролю	Малогабаритні пристрої для ручного сканування	Експлуатаційний контроль у польових умовах
Системи на Фазованих Антенних Решітках	Використання багатoelementних перетворювачів	Візуалізація дефектів у реальному часі
Роботизовані комплекси	Висока повторюваність, автоматизоване переміщення	Масове виробництво (труби, авіакосмічні вузли)

Завдяки технології лазерного ультразвуку з'явилась можливість використання коротких лазерних імпульсів для генерації акустичних коливань, що є критично важливим для контролю розпечених або композитних матеріалів.

Застосування нейронних мереж та методів глибокого навчання дозволяє здійснювати автоматичну класифікацію дефектів (тріщина, пора, непровар) і це мінімізує вплив «людського фактору» та пришвидшує обробку великих масивів даних при автоматизованому контролі великих об'єктів

Застосування електромагнітно-акустичних перетворювачів (ЕМАП) в яких збудження хвиль відбувається безпосередньо в досліджуваному об'єкті за рахунок сили Лоренца та магнітострикції.

Порівняльні характеристики сучасних, ультразвукових засобів контролю які використовуються при проведенні УЗНК наведені в таблиці 1.2

Таблиця 1.2 Порівняльні характеристики ультразвукових засобів контролю.

Параметр / Модель	Wave	Sonocon BL	OmniScan X3	Waygate USM 100	Innerspec VOLTA	Novotest EMAT-1
Виробник	Sonatest (Великобританія)	Промприлад (Україна)	Evident / Olympus (Японія)	Waygate (Krautkrämer) (Германія)	Innerspec (США/Іспанія)	Novotest (Україна)
Діапазон товщини (мм)	1 — 10 000	1 — 10 000	1 — 10 000	0.2 — 15 000	1.5 — 900	1.5 — 200
Тип перетворювачів	П'єзо (UT)	П'єзо (UT)	РА, TOFD, TFM, UT	П'єзо (UT)	ЕМАТ (магнітострикційні)	ЕМАТ (безконтактні)
Частота імп. (Гц)	10 — 3 000	10 — 1 000	до 6 000 (у UT)	10 — 2 000	1 — 100	1 — 100
Частотний діап. (МГц)	0.5 — 20	0.4 — 20	0.2 — 18	0.2 — 20	1.0 — 8.0	1.0 — 4.0
Напруга випром. (В)	100 — 400	50 — 400	до 300 (у UT)	50 — 350	400 — 800	300 — 500
Макс. вихідна напруга (В)	450	400	300	350	850	600
Діапазон підсилення (дБ)	0 — 110	0 — 100	0 — 100	0 — 110	0 — 100	0 — 100

Кожний з наведених в таблиці ультразвукових засобів контролю має як свої сильні характеристики так і недоліки.



Рисунок 1.1 Ультразвуковий засіб контролю Wave

Ультразвуковий засіб контролю Wave має чітку візуалізацію сигналу при скануванні ОК, але при дуже малих товщинах графічне відображення сигналів стає занадто щільним, що ускладнює інтерпретацію відбитків від країв зварного шва



Рисунок 1.2 Ультразвуковий засіб контролю OmniScan X3.

В ультразвуковому засобі контролю OmniScan X3 реалізовано технологію фазованих решіток, але при проведенні контролю елементів із тонкостінної сталі датчики дуже складно колібруються та з'являються паразитні шуми від структури металу, які прилад підсилює через високу чутливість.



Рисунок 1.3 Електромагнітно-акустичний ультразвуковий засіб контролю ЕМАТ-1.

Електромагнітно-акустичний ультразвуковий засіб контролю ЕМАТ-1 має труднощі з контролем сталі тонше 1.5 – 2.0 мм. Це пов'язано з тим, що зондуєчий електромагнітний імпульс дуже потужний і має велику тривалість, яка не дозволяє провести контроль приладом на малих товщинах.

До перспективних напрямів розвитку ультразвукового неруйнівного контролю належать методи, що ґрунтуються на використанні магнітострикційних ефектів [26, 27].

Фізична природа цих явищ зумовлена взаємозв'язком механічних і магнітних полів у феромагнітних матеріалах (та їхніх сплавах), які класифікуються як електромеханічно активні середовища [28]. Під впливом зовнішнього магнітного поля в таких структурах відбувається орієнтація або індукція зарядів, взаємодія яких із зовнішнім полем генерує пружні напруження та відповідні макроскопічні деформації.

Згідно з дослідженнями [29], у струмопровідних об'єктах прикладене динамічне магнітне поле збуджує силу Лоренца, що діє на носії заряду, зумовлюючи генерацію акустичних хвиль. Для феромагнітних електропровідних матеріалів характерна одночасна дія сили Лоренца та магнітострикційного ефекту. Проте в останньому випадку саме магнітострикція виступає домінантним механізмом формування ультразвукового хвильового поля, що визначає параметри акустичного тракту в таких середовищах.

1.2 Аналітичне дослідження магнітострикційних ефектів та особливостей їх застосування.

Фізична природа та математичний опис явища магнітострикції є фундаментальним фізичним явищем, що лежить в основі функціонування сучасних безконтактних перетворювачів, які використовуються для ультразвукового контролю. Суть явища полягає у зміні лінійних розмірів та форми феромагнітного тіла під впливом зовнішнього магнітного поля. Кількісною мірою ефекту є коефіцієнт лінійної магнітострикції γ , який визначається як відносна зміна довжини зразка і виражається формулою 1.1

$$\gamma = \frac{\Delta L}{L}$$

Формула 1.1 Коефіцієнт лінійної магнітострикції

де ΔL — абсолютна зміна довжини, а L — початкова довжина об'єкта.

Магнітострикційні ефекти характеризуються властивістю оборотності, що є критично важливим для реалізації повного циклу неруйнівного контролю (випромінювання та прийом сигналів) [26–28]. Найбільш широке практичне застосування мають наступні ефекти:

Прямі магнітострикційні ефекти (генерація) Джоуля та Відемана: механічна зміна лінійних розмірів матеріалу під дією змінного магнітного поля. Ефект Відемана: виникнення крутильних деформацій у феромагнітному стержні при одночасній дії поздовжнього та циркулярного магнітних полів.

Зворотні магнітострикційні ефекти (прийом):

Ефект Віллари: зміна магнітної індукції (магнітної проникності) матеріалу під дією зовнішніх механічних напружень або деформацій. Ефект Вертгейма: виникнення поздовжньої намагніченості у зразку, що закручений, при його періодичній деформації. Важливо зауважити, що зазначені ефекти є квадратичними, тобто знак деформації не залежить від полярності магнітного поля. Окрім основних ефектів, у науковій літературі описані ефект Гільємена (згинання зразка та зміна модуля Юнга) та ефект Баррета (зміна об'єму тіла) [26]. Проте через низьку амплітуду або складність технічної реалізації ці явища наразі не знаходять широкого застосування в системах УЗНК.

Перші кроки у використанні магнітострикційних ефектів були пов'язані з гідроакустикою (створення потужних випромінювачів та чутливих приймачів) [26, 28] та технологічними установками для ультразвукового зварювання, очищення та обробки крихких матеріалів. На сучасному етапі сфера застосування магнітострикційних перетворювачів (МСП) суттєво розширилася і охоплює: сенсори положення на базі магнітострикційних ліній затримки [30], датчики крутильних моментів, маси та параметрів магнітного поля [31], спеціалізовані системи для передачі та прийому направлених хвиль у валах, що обертаються [32]. Ефективність МСП як пристроїв енергоперетворення безпосередньо корелює з характеристиками матеріалів — магнітострикційною сталою та коефіцієнтом магнітомеханічного зв'язку. Останні, у свою чергу, детермінуються хімічним складом, видом термомеханічної обробки, текстурою

та оптимальним вибором поля підмагнічування. Це обумовлює актуальність досліджень нових сплавів (наприклад, на основі рідкоземельних металів типу Terfenol-D) для створення високоефективних сенсорів [33–35].

Застосування магнітострикційних ефектів у системах УЗНК має ряд переваг перед класичними п'єзоелектричними методами, особливо при проведенні ультразвукового контролю елементів енергетичного обладнання та в інших напрямках промисловості. До переваг відносяться: відсутність контактних середовищ, завдяки тому що збудження хвиль відбувається безпосередньо в металі об'єкта, що усуває потребу в мастилах чи контактних рідинах. Хвильова вибірковість, яка полягає в тому, що МСП дозволяють генерувати специфічні типи хвиль (хвилі Лемба, торсійні хвилі) [111], що є ідеальним для моніторингу протяжних об'єктів (трубопроводів, лонжеронів) на великих відстанях. Термічна стабільність досягається за рахунок високого значення точки Кюрі магнітострикційних матеріалів, що дозволяє проводити контроль при температурах, що значно перевищують ліміти п'єзокераміки.

Вагомий внесок у дослідження магнітострикційного ефекту та аналіз перспектив його використання у неруйнівному контролі зробили закордонні вчені, зокрема: Chen, X., Cobb, A., Fisher, J., Vinogradov, S. (Sensor Systems and NDE Technology Department, Southwest Research Institute, San Antonio, TX, USA) [36, 37]; Kim, Y. Y., Kwon, Y. E. (School of Mechanical and Aerospace Engineering and Institute of Advanced Machines and Design, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Republic of Korea) [29, 32]; Se-Beom Oh, Yong-Moo Cheong, Deok-Hyun Lee and Kyung-Mo Kim (Nuclear Materials Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute; Department of Materials Science and Engineering, Dankook University, Korea) [38], Ekreem, N.B., Olabi, A.G., Prescott, T., Rafferty, A., Hashmi M.S.J., (School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Dublin City University, Ireland) [27].

Проте існуючі прилади здебільшого використовують п'єзоелектричні ультразвукові сенсори, застосування яких має певні обмеження для контролю елементів як групи елементів енергетичного обладнання так і груп елементів

обладнання які використовуються в інших галузях промисловості, груп елементів які відрізняються складною геометричною формою, а умови контролю потребують розширеного діапазону робочої температури.

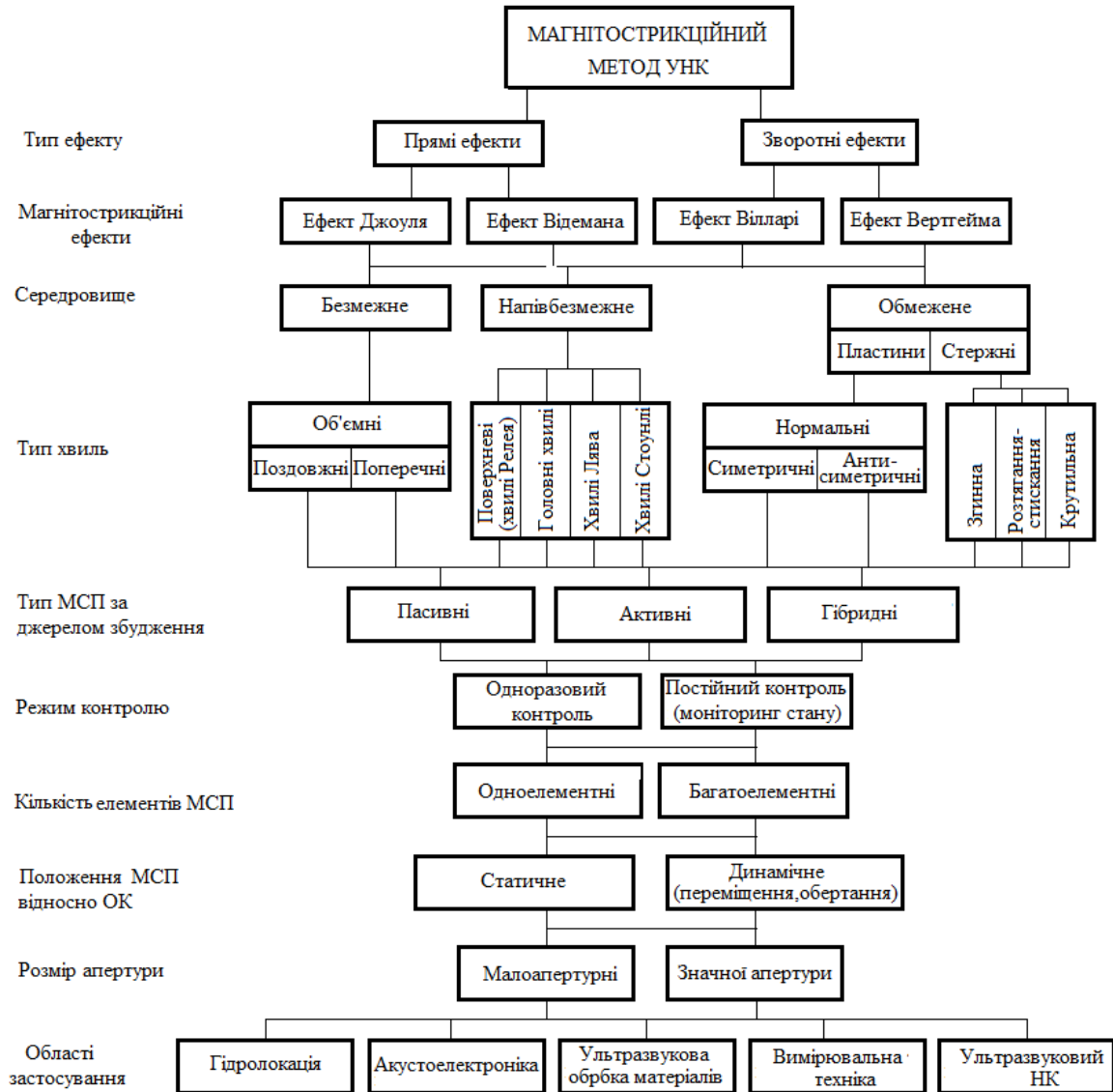


Рисунок 1.4 Класифікація магнітострикційних ефектів та їх практичне використання

На даний час можна констатувати, що сучасні методи і засоби магнітострикційного неруйнівного контролю характеризуються значним різноманіттям способів збудження та прийому пружних хвиль, а також широким спектром прикладного застосування. Систематизацію магнітострикційних ефектів та напрямів їх практичної реалізації наведено на рисунку 1.4.

Ефективність магнітострикційного перетворення тісно пов'язана з геометрією середовища поширення коливань. Відповідно до класифікації, наведеної у роботі [28], розрізняють три основні групи хвиль, що можуть бути згенеровані за допомогою магнітострикційних ефектів: хвилі в безмежних середовищах (подовжні та зсувні об'ємні хвилі), хвилі на межі поділу напівбезмежних середовищ (поверхневі хвилі Релея), хвилі в обмежених середовищах (нормальні хвилі Лемба [105,106,107,108] у пластинах та торсійні хвилі в об'єктах циліндричної форми).

Завдяки варіативності взаємодії магнітного, електричного та механічного полів, магнітострикційні ефекти здатні породжувати практично всі відомі види акустичних хвиль. Це зумовило їхнє впровадження не лише в УЗНК, а й у суміжних галузях: гідроакустиці, акустoeлектроніці, системах прецизійного вимірювання та ультразвуковій обробці матеріалів.

Для оптимізації процедури неруйнівного контролю розроблено розгалужену систему класифікації магнітострикційних перетворювачів за декількома ключовими ознаками.

За джерелом збудження пружних коливань [1]: пасивні МСП які функціонують безпосередньо за рахунок магнітострикційних властивостей матеріалу об'єкта контролю, активні МСП які містять інтегровані магнітострикційні елементи (тонкі плівки, фольги або стрижні), що виступають джерелом первинних коливань, гібридні МСП які складаються з комбінованих систем, в яких активні елементи сенсора стимулюють магнітострикційний [84] відгук у матеріалі самого ОК.

За режимом та тривалістю контролю.

За конструктивним виконанням (кількістю елементів):

Одноелементні сенсори: застосовуються для базових задач ультразвукового контролю.

Багатоелементні сенсори (фазовані решітки): найчастіше використовуються для селективного збудження крутильних та модульованих хвиль у трубопроводах і стрижневих конструкціях.

За динамікою взаємодії з об'єктом:

Статичний режим: сенсор нерухомо зафіксований відносно ОК.

Динамічний режим: передбачає взаємне переміщення сенсора та об'єкта, що є критично важливим для автоматизованих ліній неруйнівного контролю.

Важливою характеристикою МСП є розмір їхньої робочої апертури. Виділяють широкоапертурні та малоапертурні сенсори. Останні (розмір яких значно менший за довжину хвилі) є незамінними при контролі виробів складної геометричної форми, зокрема елементів енергетичного обладнання. Разом з тим, малоапертурні перетворювачі характеризуються порівняно низькою чутливістю та енергоефективністю. Це окреслює актуальний науково-технічний напрям — розроблення нових конструкційних та схемотехнічних рішень, спрямованих на подолання вказаних вад при збереженні компактності вимірювальної системи.

1.3 Стан та тенденції розвитку ультразвукового магнітострикційного методу неруйнівного контролю

Аналіз публікацій у науково-метричній базі даних Scopus опублікованих за проміжок часу з 2009 до 2024 років показує зацікавленість та загальну необхідність в розвитку методу ультразвукового магнітострикційного неруйнівного контролю

Розподіл публікацій за їх категоріями у формі кругової діаграми наведено на рисунку 1.5

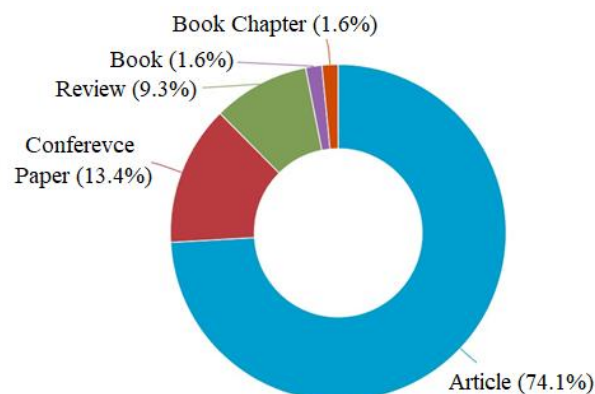


Рисунок 1.5 Розподіл публікацій за категоріями

На рисунку 1.6 наведено графік публікацій та цитувань наукових статей за тематикою магнітострикційного методу УНК який демонструє зростання залученості наукової спільноти в вирішенні задач пов’язаних з магнітострикційним неруйнівним контролем та задачами магнітострикційної дефектоскопії [90].

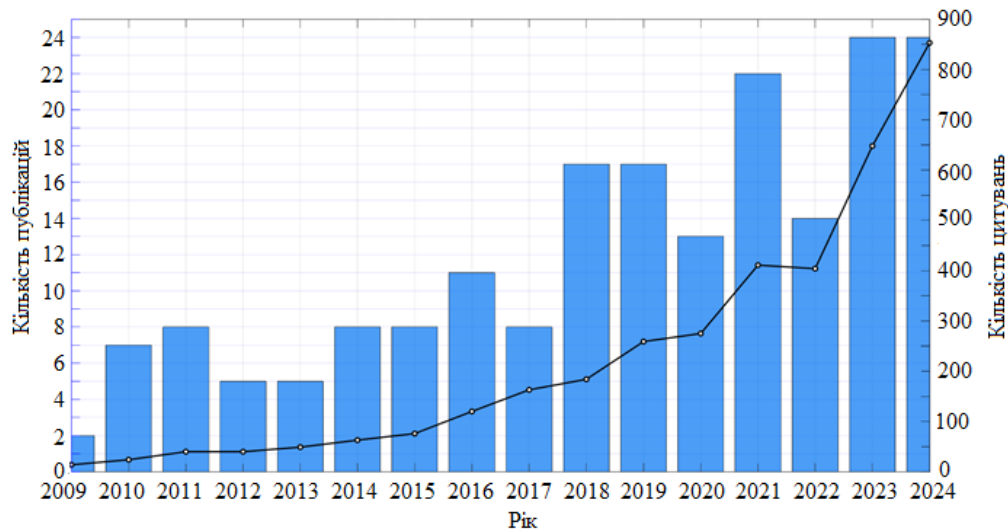


Рисунок 1.6 Графік публікацій та цитувань статей за період 2009 – 2024 роки

Наведена на рисунку 1.7 кругова діаграма відображає використання результатів досліджень магнітострикційного ультразвукового контролю в різних галузях науки та техніки

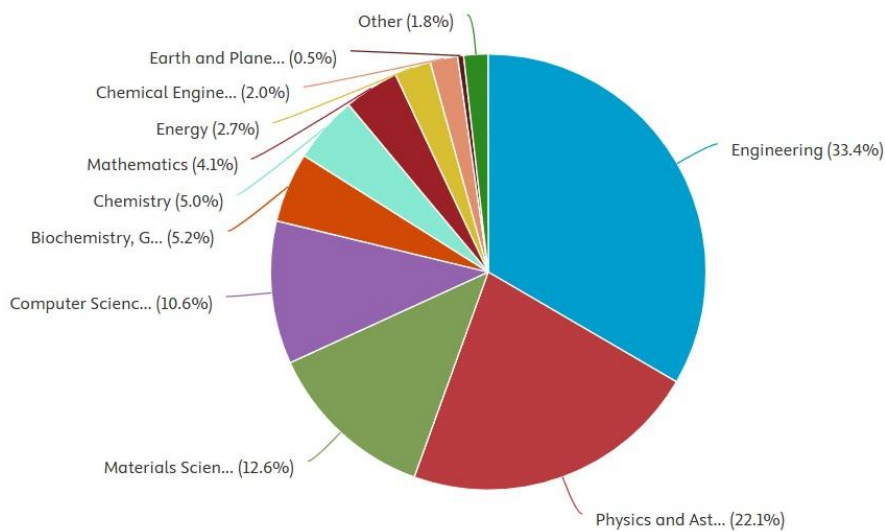


Рисунок 1.7 Діаграма, що відображає використання результатів досліджень магнітострикційного НК в різних галузях науки та техніки.

Наведений вище аналіз дає можливість зрозуміти наскільки активно на сучасному етапі розвитку методів неруйнівного контролю впроваджуються інноваційні рішення на основі магнітострикційних сенсорів (MsS — Magnetostrictive Sensors). У фундаментальних працях [29, 39] детально розглянуто нову концепцію використання MsS, яка початково була орієнтована на ультразвуковий контроль великогабаритних структур до яких відносять магістральні трубопроводи, пластинчасті конструкції, анкерні стрижні, а також сталеві канати вантових мостів. Технологія використання MsS забезпечує високу ефективність виявлення критичних дефектів, таких як корозійні ураження, ерозійне стоншення стінок та втомні тріщини в габаритних виробах. Специфіка контролю полягає у виборі оптимальних типів хвиль: для контролю конструкцій пластинчастого типу пріоритетним є використання зсувних хвиль, тоді як для огляду труб найбільш доцільним є застосування хвиль кручення. У роботі [39] наведено експериментальне підтвердження здатності MsS генерувати об'ємні зсувні хвилі, що дозволяє виявляти дефекти у виробах значної товщини (зокрема, у тестових зразках товщиною 152 мм). Проте, попри високу чутливість, практична реалізація методу стикається з труднощами: розшифровка сигналів MsS є складним процесом, що потребує високої кваліфікації оператора через насичену променеву картину поширення сигналів в об'єктах контролю. Для подолання цієї проблеми сучасна дефектоскопія використовує комплексний підхід: від фізичного керування сигналу до інтелектуальних алгоритмів обробки отриманих результатів контролю.

Технологія на основі MsS була розроблена та захищена низкою патентів США (U.S. Patent Nos. 5,456,113, 5,581,037, 5,821,430, 6,212,944 тощо) фахівцями Південно-західного дослідницького інституту (SwRI, США). Основна конструктивна схема MsS включає тонку стрічку із сплаву FeCo, що інтегрується на поверхню об'єкта контролю, накладну електричну котушку та постійний магніт для створення поля підмагнічування. Зокрема, у патенті [40] описано спосіб і апаратуру для контролю об'єктів циліндричної форми (як феромагнітних, так і неферомагнітних), що дозволяє ідентифікувати корозійні

виразки та тріщини під шарами захисної ізоляції. Це є принциповою перевагою над традиційними методами (вихрострумовим, магнітним, рентгенівським), які здебільшого орієнтовані на локальні дослідження і є малоефективними для контролю протяжних об'єктів у важкодоступних місцях. Принцип роботи магнітострикційного дефектоскопу (рисунок 1.8) базується на локальній зміні намагніченості матеріалу в зоні котушки збудження, що породжує пружну хвилю.

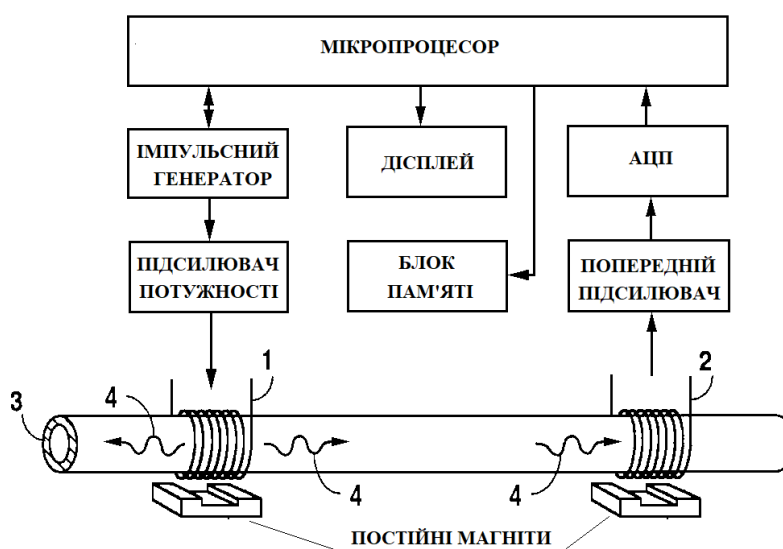


Рисунок 1.8 Структура магнітострикційного дефектоскопу [40]

Локальна зміна намагніченості матеріалу труби в околі котушки збудження 1 викликає лінійні зміни матеріалу труби 3 в напрямку паралельному прикладеному електромагнітному полю. Пружна хвиля 4 поширюється всередині матеріалу. Постійні магніти створюють магнітне поле зміщення, необхідне для забезпечення роботи перетворювачів у лінійному режимі. Відбившись від дефекту чи іншої аномалії матеріалу труби або від кінця труби пружна хвиля надходить до приймальної котушки 2 і в результаті зворотного магнітострикційного ефекту перетворюється у електричний сигнал, який фіксується електронними засобами аналізу сигналів.

Переваги цієї технології включають високу чутливість магнітострикційних сенсорів [91], їх довговічність, відсутність потреби акустичного контакту

сенсор/матеріал, великий діапазон поширення пружних хвиль, простота реалізації та низька вартість сенсорів та електронних блоків.

В основі методу направленої ультразвукової хвилі (the guided wave ultrasonic technique) лежить використання специфічних типів хвиль, що поширюються вздовж геометричних меж витягнутих структур: трубопроводів, стрижнів, пластин та залізничних рейок. На відміну від класичного ультразвуку, ці хвилі «керуються» самими стінками об'єкта, що дозволяє їм долати відстані у сотні метрів від точки випромінювання. Вибір частоти критично залежить від товщини виробу. Зазвичай використовуються низькочастотні коливання від 10 кГц до кількох МГц, що забезпечує низьке згасання сигналу. Для ефективного контролю труб використовують крутильні (торсійні) хвилі, вони найбільш ефективні оскільки менш чутливі до наявності рідини всередині та мають стабільну швидкість поширення. Для формування рівномірного хвильового фронту, який охоплює весь переріз труби, використовують осьово-симетричні хвилі. Для їх збудження використовується кільцевий масив перетворювачів. Найчастіше застосовується луна-імпульсний режим, де той самий масив датчиків спочатку генерує спрямований імпульс, а потім реєструє відбиті хвилі від дефектів або конструкційних елементів (зварних швів, фланців).

В цілому в УЗНК, орієнтованому на використання ММП доцільно застосовувати методи відлуння, проходження та комбіновані [73]. Наочним представником методів відлуння є лунаімпульсний метод. На рисунку 1.9 наведена схема лунаімпульсного методу

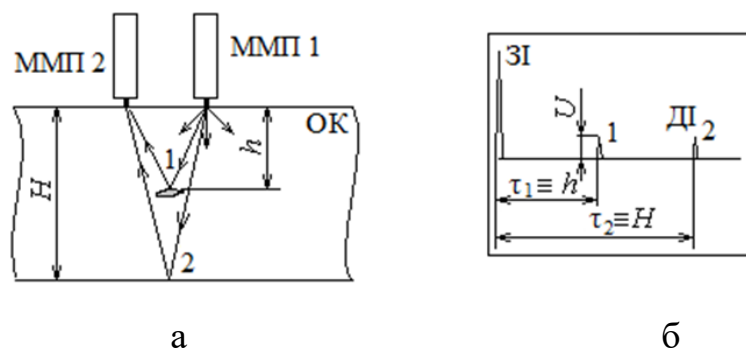


Рисунок 1.9 Схема лунаімпульсного методу (а) та схематичний часовий ряд сигналів МСП

На рисунку 1.9 позначено: ЗІ – зонduючий імпульс, ДІ – донний імпульс. В цьому методі ЗІ є носієм інформації, а саме – час затримки містить інформацію про глибину залягання дефекту в ОК, а його амплітуда несе інформацію про розміри (відбивну здатність) дефекту.

Методи проходження (тіньовий, часовий та фазовий) ґрунтуються на аналізі хвиль, що пройшли через матеріал ОК від ММП-випромінювача до ММП-приймача рисунку 1.10.

На рисунку 1.10 позначено: ГЗС – генератор зонduючих імпульсів, ЕТ – електронний тракт. В тіньовому методі (рис. 9 а) інформаційним параметром є амплітуда сигналу. Дефект створює тінь на шляху поширення хвилі від ММП1 до ММП2.

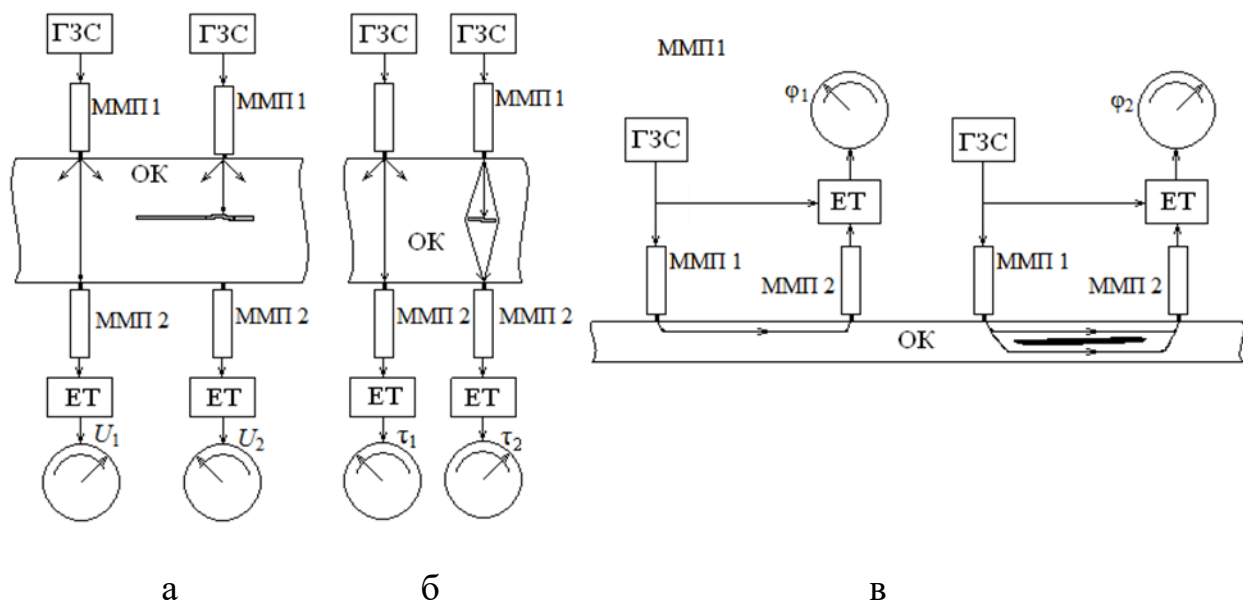


Рисунок 1.10 Ілюстрація сутності методів проходження : а – тіньового, б – часового, в – фазового

Часовий метод (рис.1.10б) ґрунтується на визначенні часу пробігу акустичних хвиль через ОК. Внаслідок дифракції хвиль на краях тріщини час поширення сигналу від ММП1 до ММП2 збільшується. В цьому випадку інформаційним параметром є затримка сигналу на поширення в ОК. Фазовий метод (рис.1.10в) ґрунтується на визначенні фазового зсуву, як інформаційного параметру, між випроміненим та прийнятим сигналами. За наявності дефекту,

орієнтованого вздовж поверхні пластини, фазовий зсув збільшується. Певним недоліком методів проходження є неможливість визначення положення дефекту на акустичній осі

У дослідженні [41] описано застосування сенсорів на базі магнітострикційної лінії затримки (MDL – magnetostrictive delay line) для неруйнівного контролю самих акустичних хвильоводів (стрічок, дротів). У цій конфігурації об'єктом аналізу виступає безпосередньо матеріал MDL, а ключовим індикатором його якості є параметри поширення пружних хвиль. Основним завданням методу є прецизійне вимірювання поздовжньої швидкості звуку та оцінка її рівномірності по всій довжині зразка. Процес реалізується через аналіз часових інтервалів. Отримані дані про розподіл швидкості звуку є важливими для визначення магнітострикційних характеристик матеріалів. Швидкість акустичної хвилі в магнітострикційних матеріалах безпосередньо корелює з їхньою магнітною проникністю та ефективністю електромеханічного зв'язку.

У роботі [36] представлено поглиблений аналіз та результати проєктування лінійного скануючого магнітострикційного перетворювача (MsT – magnetostrictive transducer), [92] спеціалізованого для дефектоскопії високо напірних трубопроводів та резервуарів. Ключовою особливістю розробки є адаптація конструкції MsT для виявлення корозійного витончення стінок та тріщин у зонах зварних швів. Запропонований перетворювач вирізняється оригінальною конструкцією, що забезпечує високу точність сканування. MsT реалізований як система лінійно-скануючих елементів, де рухомий постійний магніт приводиться в дію спеціальним двигуном. Це дозволяє здійснювати прецизійне просторове охоплення зони контролю. Фізична гнучкість зонда MsT є його важливою перевагою, оскільки вона дозволяє щільно встановлювати перетворювач на поверхні з різним радіусом кривизни, забезпечуючи стабільний акустичний контакт. Робота магнітострикційного перетворювача оптимізована під конкретні фізичні параметри хвильового процесу [92]. MsT ефективно функціонує в межах 20 – 500 кГц, що є оптимальним для балансу між роздільною

здатністю та дальністю контролю. Перетворювач спроектований для збудження поперечних хвиль з горизонтальною поляризацією (SH - Shear Horizontal waves). Вибір SH-хвиль зумовлений їхньою здатністю поширюватися на відносно великі відстані з низькою дисперсією та низьким згасанням. Це дозволяє отримати високу ефективність виявлення тріщин, орієнтованих перпендикулярно до напрямку поширення хвилі.

У роботі [42] обґрунтовано вибір принципу магнітострикції для ультразвукового контролю об'єктів, що працюють в умовах екстремального нагріву. Автори наголошують, що традиційна п'єзоелектрична технологія є неприйнятною для таких задач, оскільки високі температури призводять до деполяризації п'єзоелементів, руйнування контактних середовищ та відшарування перетворювачів.

На противагу обмеженням існуючим для п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП), запропоноване рішення базується на використанні аморфних металевих смуг як магнітострикційних сердечників. Це дозволяє забезпечити стабільну роботу системи за температури 350 °С, що є недосяжним для стандартних п'єзодатчиків без складних систем охолодження. Розроблений перетворювач із робочою частотою ~1 МГц орієнтований на специфічні умови інспекції корпусів ядерних реакторів із натрієвим охолодженням (товщина стінок 25–40 мм), де безконтактність або термічна стійкість чутливого елемента є критичною вимогою.

У праці [43] обґрунтовано важливе значення горизонтально поляризованих поперечних хвиль (SH-хвиль) для систем структурного моніторингу та неруйнівного контролю. Доведено, що близькість дисперсійних характеристик SH-хвиль у пластинах, а також кільцевих і торсійних хвиль у трубах дозволяє класифікувати останні як варіації SH-типів хвиль, а також систематизовано принципи роботи, конфігурації та обмеження перетворювачів для їх збудження і прийому.

У роботі [44] розв'язано актуальну задачу виявлення множинних корозійних дефектів у донних пластинах великогабаритних нафтових

резервуарів. На відміну від традиційних методів неруйнівного контролю, таких як магнітопорошкова дефектоскопія або вихрострумний контроль, які потребують ретельного очищення поверхні та мають обмежену глибину проникнення, або п'єзоелектричного УЗНК, що критично залежить від якості акустичного контакту та стану поверхні, авторами запропоновано технологію на основі магнітострикційного ефекту. Ключовою перевагою обраного підходу є використання низькочастотних горизонтально поляризованих хвиль (SH₀), які, на відміну від хвиль Лемба, не зазнають значної дисперсії та менш чутливі до впливу робочого середовища (нафтопродуктів). Для реалізації методу розроблено 8-канальний магнітострикційний перетворювач (робоча частота 70 кГц), конструкція якого базується на стрічці зі сплаву FeCo (200×25,4×0,1 мм) та постійних магнітах NdFeB. На відміну від ЕМАТ-систем (електромагнітно-акустичних перетворювачів), які часто потребують високих енерговитрат для генерації хвиль у феромагнітних сталях, магнітострикційна конструкція, інкапсульована в епоксидну смолу, демонструє вищу ефективність збудження хвиль SH-типу при нижчих енергетичних порогах. Для компенсації обмеженої роздільної здатності низькочастотних хвиль запропоновано режим керованого обертання перетворювача з наступною програмною «зшивкою» зображень. Експериментально доведено, що такий підхід забезпечує високу прецизійність: при восьми циклах обертання мінімальна відносна похибка локалізації дефекту становить ~4,3%, а абсолютна кутова похибка не перевищує ~2,16°, що робить систему конкурентоспроможною порівняно з дорожчими фазованими решітками.

У роботі [37] констатовано зростаючий попит на ринку засобів неруйнівного контролю на МСП з покращеними характеристиками, зокрема на основі зворотного ефекту Відемана. Новий МСП на основі зворотного ефекту Відемана відкрив низку нових можливостей для використання у неруйнівному контролі. Забезпечивши контроль без рідинного контакту, високу термостійкість для роботи на діючих теплообмінниках, збудження SH-хвиль з низькою дисперсією та високою довговічністю. Розглянуто застосування автоматизованих

всенаправлених зондів для контролю труб, великогабаритних оболонок, а також контроль пластин та анкерних стрижнів.

У дослідженні [45] обґрунтовано застосування магнітострикційних ефектів для кількісного оцінювання втомної деградації сталевих ниток, що є критичними несучими елементами вантових мостів. Оскільки тривала експлуатація таких конструкцій під впливом циклічних навантажень та агресивних метеофакторів неминуче призводить до накопичення втомних пошкоджень, особливої ваги набуває пошук чутливих діагностичних параметрів. Авторами запропоновано використовувати коефіцієнт акустичної нелінійності та коефіцієнт затухання (ослаблення) ультразвукової хвилі, збуджуваної МСП, для оцінки стану матеріалу. У роботі експериментально встановлено кореляційні залежності, що пов'язують ці показники з часом циклічного навантаження. Коефіцієнт нелінійності демонструє виражене зростання пропорційно накопиченню мікроструктурних змін, що дозволяє ідентифікувати стадію зародження втомних тріщин ще до появи видимих макродефектів. Коефіцієнт затухання виступає індикатором розсіювання енергії хвилі на неоднорідностях, що виникають у процесі деградації сталевих ниток. Виявлена закономірність монотонного зростання обох коефіцієнтів залежно від тривалості циклічного впливу дозволяє використовувати їх як надійні критерії для прогнозування залишкового ресурсу та оцінки поточної цілісності вантових конструкцій.

У статті [46] наведено комплексний аналіз характеристик магнітострикційних сенсорів (МСС), призначених для ультразвукового контролю та довготривалого моніторингу трубопровідних систем. Авторами підтверджено високу ефективність методу направлених хвиль (GWUT), який дозволяє здійснювати суцільну дефектоскопію та локалізувати корозійні ураження або порушення цілісності на значних відстанях — до десятків метрів від точки встановлення датчика. Особливу увагу приділено порівняльним характеристикам чутливості сенсорів залежно від матеріалу магнітострикційного елемента. Серед ключових технічних особливостей сучасних МСП виділено наступні:

Висока амплітудна ефективність: Експериментально доведено, що використання смужок зі сплаву залізо-кобальт (FeCo) дозволяє генерувати ультразвукові хвилі, амплітуда яких у 5–10 разів перевищує показники традиційних нікелевих (Ni) сенсорів. Це суттєво розширює динамічний діапазон системи та збільшує контрольовану ділянку труби.

Висока термостабільність: На відміну від п'єзокераміки, МСП на основі FeCo зберігають працездатність при значних термічних навантаженнях, що є критичним для нафтогазової та теплоенергетичної галузей.

Конструктивна гнучкість: Можливість «сухого» акустичного контакту та герметизація датчиків забезпечують їх стабільну роботу в агресивних середовищах протягом тривалого часу без деградації сигналу.

Селективність збудження мод: Параметри сенсорів дозволяють ефективно генерувати подовжні та торсійні хвилі, мінімізуючи небажану дисперсію сигналу.

Впровадження таких сенсорів забезпечує надійну ідентифікацію дефектів на ранніх стадіях, значно знижуючи витрати на обслуговування трубопроводів через відсутність потреби в повному знятті ізоляції по всій довжині об'єкта.

У роботі [47] представлено високоефективну систему ультразвукового моніторингу, призначену для безперервного відстеження процесів утворення дефектів в трубопроводах із обмеженим доступом. Використання магнітострикційних сенсорів (МСП) у режимі крутильних хвиль демонструє значну перевагу над традиційними методами завдяки здатності хвиль поширюватися на великі відстані та реагувати на найменші зміни площі поперечного перерізу труби (корозію, виїмки). Ефективність технології обумовлена винятковою часовою стабільністю параметрів збуджуваного імпульсу. Це дозволило впровадити оригінальний алгоритм диференційного аналізу, який шляхом віднімання опорного сигналу мінімізує неінформативні завади. Такий підхід є важливим для контролю зварних з'єднань, де високий рівень структурних шумів зазвичай ускладнює інтерпретацію результатів. Основними напрямками реалізації даної технології є: моніторинг

важкодоступних ділянок: контроль трубопроводів під шаром теплоізоляції, у місцях прокладання крізь стіни або в підземних переходах без їх розкриття, діагностика зварних швів: виявлення втомних тріщин та корозії в зоні термічного впливу за умов підвищеного структурного шуму, створення стаціонарних мереж моніторингу на об'єктах критичної інфраструктури для відстеження динаміки деградації металу в реальному часі. Використання методик фазового узгодження сигналів дозволяє експлуатувати систему на відкритих ділянках трубопроводів, нівелюючи вплив коливань температури навколишнього середовища. Завдяки стаціонарному встановленню сенсорів забезпечується висока відтворюваність результатів, що робить магнітострикційну технологію оптимальним рішенням для довгострокового нагляду за цілісністю промислових об'єктів.

Перспективним, проте недостатньо вивченим напрямом розвитку сучасної дефектоскопії є розробка та впровадження малоапертурних магнітострикційних перетворювачів (ММП) [48-51]. Для забезпечення максимальної амплітуди випромінюваних хвиль та стабільності характеристик ММП, критично важливим є обґрунтований вибір матеріалу хвилевода. У сучасних розробках перевага надається матеріалам із високим коефіцієнтом магнітострикції та термічною стійкістю: нікель (Ni), пермендюр (сплав Fe-Co-V), сплави на основі рідкоземельних металів (наприклад, Терфенол-Д), аморфні та нанокристалічні стрічки/дроти. Актуальність глибоких досліджень у цій сфері зумовлена складністю фізичних процесів формування пружних хвиль у точці контакту хвилеводу з об'єктом контролю (ОК). Оскільки діаметр хвилеводу становить лише 0,5...1,5 мм, такий перетворювач функціонує як напівсферичний точковий випромінювач, що відкриває унікальні можливості для прецизійної діагностики в геометрично складних умовах. Попри відносно низьку енергетичну ефективність порівняно з великогабаритними системами, технологія МСП має низьку суттєвих переваг, які роблять її незамінною для специфічних задач УЗНК: мала апертура дозволяє забезпечити стабільний акустичний контакт із деталями значної кривизни (малі радіуси закруглень, фаски, переходи), де використання традиційних плоских датчиків є неможливим, конструкція з винесеним

хвилеводом дозволяє дистанціювати активну частину (котушку та магніт) від розпеченої поверхні ОК, що забезпечує стабільну роботу за екстремальних термічних умов без складних систем охолодження, точковий характер випромінювання дозволяє реалізовувати сканування з високим кроком дискретизації, що критично важливо для точної локалізації мікродефектів, можливість об'єднання великої кількості МСП у багатоеlementні матричні перетворювачі для створення систем цифрового фокусування та візуалізації дефектів у реальному часі.

Подальше вивчення особливостей поширення хвиль від МСП в однорідних та обмежених середовищах є необхідним кроком для оптимізації їхньої конструкції та розширення сфери практичного застосування в авіаційній, енергетичній та машинобудівній галузях.

1.4. Аналіз елементів енергетичного обладнання як об'єктів ультразвукового неруйнівного контролю

Забезпечення стійкої безаварійної роботи енергетичного обладнання, завчасне виявлення дефектів на етапі зародження та спостереження за їх розвитком в процесі експлуатації потребує постійного удосконалення засобів та методів моніторингу [96], діагностики та контролю як окремих елементів, так і об'єктів енергетики в цілому [1]. Різноманіття завдань моніторингу енергетичного обладнання не дає змоги охопити все коло актуальних питань застосуванням одного-двох методів неруйнівного контролю. Постійне ускладнення завдань контролю, розширення їх кола, використання в енергетичному обладнанні нових конструкційних матеріалів стимулює пошук нових методів і засобів контролю та удосконалення як апаратної, так і програмно-алгоритмічної частини сучасних засобів НК [97].

Тонкостінні елементи (з товщиною стінки до 2 мм) в енергетичному обладнанні є критично важливими вузлами, оскільки вони працюють у складних умовах: високий тиск, температурні перепади, вібрації та корозійне середовище.

Нижче, в таблиці 1.3 наведено процентне відношення основних тонкостінних елементів, що потребують регулярного контролю та інших

товстостінних конструкцій [116] (корпуси реакторів, котлів, турбін, магістральні трубопроводи) в енергетичних об'єктах.

Таблиця 1.3 Типи елементів які потребують контролю

Тип елемента	Частка %
Теплообмінні трубки (конденсатори, ПНТ)	12%
Пластинчасті теплообмінники	4%
Сільфонні компенсатори	2%
Оболонки ТВЕЛів	5%
Інші елементи (корпуси, товстостінні труби та ін.)	77%

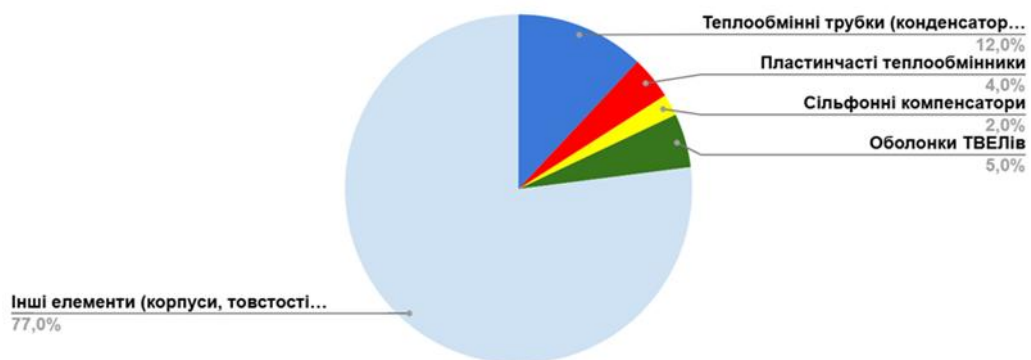


Рисунок 1.11 Діаграма тонкостінних та товстостінних елементів обладнання енергетичного об'єкта.

Діаграма на рисунок 1.11 показує про вагову частку тонкостінних елементів (товщиною до 2 мм) у загальній кількості елементів обладнання енергетичного об'єкта. І хоча основну масу об'єкта складають великогабаритні конструкції із товстостінних елементів тонкостінні елементи енергетичного обладнання є критично важливими для роботи всього енергетичного об'єкту і потребують постійного контролю стану.

В залежності від конструкційних особливостей об'єктів контролю, режиму та умов роботи, контроль таких елементів стикається з певними труднощами.

Теплообмінні трубки. Це найпоширеніша категорія. Трубки з товщиною стінки 0,5–1,5 мм використовуються для забезпечення максимально ефективної передачі тепла. Труднощі, які виникають при контролі: імпульсу: при товщині

1 мм відбиття від донної поверхні приходить настільки швидко, що воно "ховається" в сигналі від поверхні введення.

Конденсатори турбін . Трубки з титану або нержавіючої сталі часто мають стінку 0,7–1,0 мм. Конденсатори в системі парових турбін (на ТЕС, ТЕЦ або АЕС) — це масивні теплообмінні апарати, які виконують дві ключові функції для забезпечення роботи енергоблока: підвищення ККД та рекуперація робочого тіла. При здійсненні контролю головна проблема ехо-імпульсного методу — тривалість зондуючого імпульсу.

Регенеративні підігрівачі низького тиску (ПНТ). Тонкостінні трубки є невід'ємною частиною теплової схеми паротурбінних установок на ТЕС та АЕС. Їх використовують для попереднього підігріву конденсату перед його подачею в деаератор та котел. ПНТ працюють у режимі постійних температурних циклів, що призводить до втомних явищ у трубках товщиною 1,0–1,5 мм.

Пластинчасті теплообмінники (ПТО). Самі пластини виготовляються методом штампування з листа товщиною 0,4–0,8 мм. ПТО використовують для високоефективного теплообміну між двома рідкими або газоподібними середовищами без їх змішування. Але за рахунок складної геометрії, контроль можливий лише в розібраному стані.

Сільфонні компенсатори. Використовуються для компенсації температурних розширень трубопроводів. Це гофрована оболонка, щоб вона була гнучкою, її виготовляють із дуже тонкого металу (зазвичай 0,2–1,2 мм). Труднощі які виникають під час проведення контролю: складна геометрія, наявність гофрів (вигинів) робить неможливим щільне прилягання стандартних ультразвукових датчиків.

Екрани камер згоряння. Це тонкостінні панелі або кожухи з жароміцних сплавів, що захищають корпус турбіни або котла від прямого впливу полум'я. Товщина з яких формуються екрани камер згоряння (екранні труби котлів), залежить від робочого тиску пари та теплового навантаження конкретного агрегату. При проведенні контролю співвідношення "сигнал/шум" критично низьке.

В таблиці 1.4. наведені елементи енергетичного обладнання до складу яких входять тонкостінні конструктивні елементи.

Таблиця 1.4 Елементи енергетичного обладнання до складу яких входять тонкостінні конструктивні елементи.

Елемент енергетичного обладнання	Призначення	Товщина стінок, мм	Труднощі при контролі
Теплообмінні трубки	забезпечення максимально ефективної передачі тепла	0,5 - 1,5	тривалість зондуючого імпульсу
Конденсатори турбін	підвищення ККД, рекуперації робочого тіла.	0,7 – 1,0	швидко приходить відбиття від донної поверхні
Регенеративні підігрівачі низького тиску	попередній підігрів конденсату перед його подачею в деаератор та котел	1 – 1,5	стоншення стінки з 1,2 мм до 0,8 мм
Пластинчасті теплообмінники	високоєфективний теплообмін між двома рідкими або газоподібними середовищами	0,4 – 0,8	складна геометрія
Сільфонні компенсатори	компенсація температурних розширень трубопроводів	0,2 – 1,2	наявність вигинів гофри
Оболонки ТВЕЛів	забезпечують герметичність палива в ядерній енергетиці	0,6 – 0,9	дефекти глибиною 0,05 мм
Екрани камер згоряння	захищають основний корпус від прямого впливу факела	2,0 – 3,0	співвідношення "сигнал/шум" критично низьке

Дефекти в елементах енергетичного обладнання класифікують залежно від етапу їх виникнення: технологічні ті які виникають під час виготовлення елементів та експлуатаційні які з'являються під дією високих температур, тиску та агресивного середовища.

1. Технологічні дефекти зварних з'єднань- це класичні дефекти, які виявляють системами УЗНК [104_4] :

Непровари - відсутність з'єднання між металом шва та основним металом або між валика шва. Найнебезпечніші площинні дефекти. Тріщини - поздовжні або поперечні розриви металу. Шлакові включення - частинки флюсу або оксидів, що залишилися всередині шва. Пори (газові порожнини) - одиничні або скупчення бульбашок газу. Підрізи - заглиблення в основному металі вздовж межі шва (знижують міцність стінки).

2. Експлуатаційні дефекти - пошкодження розвиваються з часом і потребують регулярного моніторингу вони найбільш критичні для енергетики:

Втомні тріщини - виникають через циклічні навантаження та вібрації (особливо на роторах турбін та гнутих ділянках труб). Корозійне розтріскування під напругою - поява сітки дрібних тріщин через вплив хімічно активного середовища (наприклад, живильної води). Ерозійне зношування - вимивання (потоншення) стінки труб парою або конденсатом. Повзучість - незворотна деформація та поява мікропор у металі, що працює при температурах понад 450°C. Графітізація - зміна структури сталі, що робить її крихкою (характерно для тривалої експлуатації).

3. Дефекти основного металу:

Розшарування - порушення суцільності металу паралельно поверхні (часто в листовій сталі). Флокени - тонкі внутрішні тріщини, спричинені воднем. Неметалеві включення - залишки домішок у сталі.

Тонкостінні елементи енергетичного обладнання (труби малих діаметрів, екрани котлів, теплообмінники з товщиною стінки зазвичай від 0,5 до 8-10 мм) мають специфічний набір дефектів. Через малу товщину навіть незначне пошкодження може призвести до швидкого прориву.

1. Технологічні.

У тонкостінних стиках складніше витримати режим зварювання, тому часто виникають:

Пропали - через надлишкове тепло метал витікає всередину труби, утворюючи отвір або великий наплив.

Непровар кореня шва - найкритичніший дефект для тонких стінок, оскільки він стає концентратором напружень і місцем накопичення відкладень.

Зміщення крайок - навіть невелике розходження (на 1-2 мм) у тонкостінних трубах створює суттєвий перепад, що заважає якісному УЗНК.

Втягування металу шва всередину - зменшує фактичну товщину стінки в зоні зварювання.

2. Експлуатаційні дефекти.

Корозія - поява глибоких вузьких порожнин (точкових роз'їдань) на внутрішній поверхні. Для тонкої стінки це найшвидший шлях до свища.

Ерозія (золоче або парове зношування) - рівномірне або локальне потоншення стінки через тертя частинок попелу або пари.

Корозійна втома - утворення сітки дрібних тріщин через вібрацію труб у поєднанні з агресивним середовищем.

Перегрів - через локальний перегрів метал стає пластичним, стінка тоншає і випинається назовні (характерно для екранних труб котлів).

1.5 Висновки до розділу 1.

Одним із найперспективніших напрямів розвитку ультразвукового неруйнівного контролю) є дослідження магнітострикційних методів із використанням малоапертурних перетворювачів [93], створення на цій основі нових ефективних засобів діагностики та їх впровадження у широку практику. Перевагами магнітострикційної технології є принципова відмінність від традиційних методів, що базуються на п'єзоелектричних перетворювачах, вони полягають в особливій технології, яка не вимагає спеціальної підготовки поверхні об'єктів контролю та використання імерсійних рідин (контактних гелів, мастил) для забезпечення акустичного контакту. Основні переваги магнітострикційного методу полягають у стабільності сигналу, створювані пружних коливань, які відрізняються високою стабільністю і повторюваністю характеристик. Застосування ММП дає змогу здійснювати контроль у тонкостінних елементах енергетичного обладнання, широкому діапазоні температур, за умов "сухого контакту" та на поверхнях зі значною кривизною

[92]. Магнітострикційний метод дозволяє генерувати специфічні хвильові моди, зокрема зсувні хвилі з горизонтальною поляризацією. Він не потребує витратних матеріалів (контактних рідин) та їх подальшої утилізації, що робить метод безпечним для персоналу та навколишнього середовища.

Особливу актуальність магнітострикційні методи набувають при діагностиці тонкостінних елементів енергетичного обладнання (товщиною до 2 мм), таких як трубки конденсаторів, регенеративних підігрівачів, сільфонні компенсатори та екрани камер згорання. Використання ММП у енергетичній сфері дає ряд переваг при здійсненні контролю, збудження нормальних хвиль (хвиль Лемба [102]), які поширюються вздовж усієї товщини стінки на значні відстані. дає змогу контролювати важкодоступні ділянки тонкостінних трубок, мінімізація "мертвої зони": Малоапертурні перетворювачі дозволяють краще локалізувати зону введення енергії, що є принциповим для виявлення дефектів у тонких стінках, де відбиття від поверхонь відбувається за інтервали часу які вимірюються мікросекундами. Також дозволяють проведення діагностики без демонтажу: оскільки ММП не потребують ідеальної чистоти поверхні, вони стають ефективним інструментом для оперативного контролю тонкостінних вузлів в умовах діючого енергоблока.

Незважаючи на значний обсяг проведених досліджень, проблематика застосування магнітострикційних ефектів залишається відкритою. Створення засобів УЗНК на основі малоапертурних перетворювачів стикається з викликом їх відносно низької чутливості та ефективності енергоперетворення. Внаслідок виникнення в об'єктах контролю значного числа різних типів хвиль (модової конверсії) та різноманіття видів дефектів, виникають труднощі в інтерпретації результатів. Це вимагає проведення поглиблених теоретичних та практичних досліджень, а також розроблення нових конструктивних та схемотехнічних рішень для підвищення енергоефективності магнітострикційного тракту в неруйнівному контролі.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МАГНІТОСТРИКЦІЙНОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

2.1. Аналіз факторів впливу при неруйнівному ультразвуковому контролі з використанням ммп

Для детального аналізу факторів впливу на достовірність неруйнівного ультразвукового контролю з використанням малоапертурних магнітострикційних перетворювачів [98] побудовано діаграму наведену на рис.2.1, які показує складну взаємозалежність між технічними параметрами системи та фізичними властивостями об'єкта.



Рис. 2.1 – Діаграма факторів впливу на достовірність неруйнівного ультразвукового контролю з використанням малоапертурних магнітострикційних перетворювачів

Достовірність результатів вимірювальної системи безпосередньо залежить від процедури калібрування. Цей етап є важливим для мінімізації невизначеностей, забезпечуючи необхідну точність при ідентифікації та

кількісній оцінці параметрів виявлених дефектів. Особливої уваги потребує стабільність геометричних параметрів, оскільки зміна відстані між перетворювачами безпосередньо корелює з фазовими та амплітудними характеристиками сигналу. Надійність апаратно-програмного забезпечення ґрунтується на синергії обчислювальних алгоритмів та параметрів аналого-цифрового перетворювача (АЦП). При цьому загальна невизначеність вимірювання, зумовлена адитивними шумами та дискретною природою сигналу, встановлює фактичну межу чутливості методу та обмежує можливість виявлення дефектів.

Методологічні аспекти контролю визначаються обраною схемою контролю, та типом хвилі. Частота зондування в цьому контексті виступає параметром який визначає тип та моди хвиль, що підлягають подальшому апаратному та програмному опрацюванню. Зовнішнє середовище вносить додаткові завади, серед яких найбільш критичними є електромагнітні завади, до яких чутливі котушки перетворювача, та температура, що змінює швидкість поширення ультразвуку та вимагає постійної корекції бази часу [115]. Стан поверхні об'єкта, включаючи шорсткість та наявність покриттів, впливає на умови акустичного зв'язку, навіть при використанні переваг «сухого» контакту, притаманного магнітострикційному методу.

Властивості матеріалів об'єкту контролю, такі як магнітна проникність, пружність та ступінь магнітострикції, визначають ефективність введення акустичної енергії, тоді як геометричні характеристики об'єкту контролю, зокрема його кривизна та наявність ребер жорсткості, створюють умови для виникнення структурних шумів та хибних сигналів. Обладнання системи має забезпечувати високу стабільність, оскільки нестабільність напруги та струму живлення призводить до коливань потужності випромінювання та помилок у визначенні розмірів дефектів. Конструкція ММП, що передбачає використання спеціалізованих сплавів для хвилеводів та двосекційних котушок для диференціального прийому, дозволяє частково нівелювати зовнішні впливи,

проте електронний тракт повинен мати високий коефіцієнт підсилення та ефективну фільтрацію для виділення корисного сигналу. Суб'єктивний фактор є важливим, оскільки позиціонування перетворювача оператором безпосередньо зумовлює енергетичну ефективність введення пружних коливань та стабільність акустичного контакту, а його здатність до інтерпретації результатів визначає кінцеву достовірність діагностики.

2.2 Особливості формування сигналів в акустичному тракті засобу УЗНК з ММП

Різноманіття мод пружних хвиль, що поширюються у твердотільних структурах, детермінує широку номенклатуру аналітичних завдань, що реалізуються методами ультразвукового неруйнівного контролю. Зокрема, до їх переліку належать: ідентифікація мікроструктурних особливостей матеріалів, прецизійний контроль якісних характеристик металевих та композитних виробів, а також комплексна оцінка надійності зварних з'єднань та визначення суцільності внутрішньої структури матеріалів. Такі можливості пояснюються не тільки різноманіттям пружних коливань, але й тим, що при їх поширенні в середовищі виникають деформації стискання і зсуву, які переносяться хвилею з однієї точки середовища в іншу. Швидкість поширення хвиль та їх ослаблення внаслідок поглинання хвилі, структурного розсіювання та розширення звукового пучка пов'язані (функціонально чи кореляційно) з фізико-механічними характеристиками матеріалів, наявністю в них неоднорідності та геометричними розмірами виробів.

В залежності від умов поширення пружні хвилі розділяють на 3 групи [2,73]:

- об'ємні хвилі (поздовжні та поперечні), що поширюються у напівбезмежних (безмежних) середовищах;
- хвилі, що поширюються поблизу меж двох напівбезмежних середовищ (поверхневі хвилі або хвилі Релея та головні або підповерхневі хвилі);
- хвилі, які формуються і поширюються в обмежених середовищах (у пластинах – нормальні хвилі або хвилі Лемба [103, 110, 112] симетричні і антисиметричні, у стрижнях – згинні хвилі та хвилі розтягнення-стискання).

У поздовжніх хвилях частинки середовища коливаються в напрямку поширення хвилі, а у поперечній – перпендикулярно напрямку поширення. Поверхневі хвилі поширюються вздовж ненавантаженої поверхні напівбезмежного середовища у приповерхневому шарі завтовшки не більше $1,5\lambda$, тобто не більше півтори довжини хвилі. Підповерхневі хвилі поширюються під кутом $12^\circ \dots 15^\circ$ до поверхні і швидко загасають. Нормальні хвилі формуються в пластинах [113] як суперпозиція падаючої хвилі з багаторазово відбитою хвилею всередині пластини. Можливим є виникнення симетричних і антисиметричних нормальних хвиль (рис. 2.2)

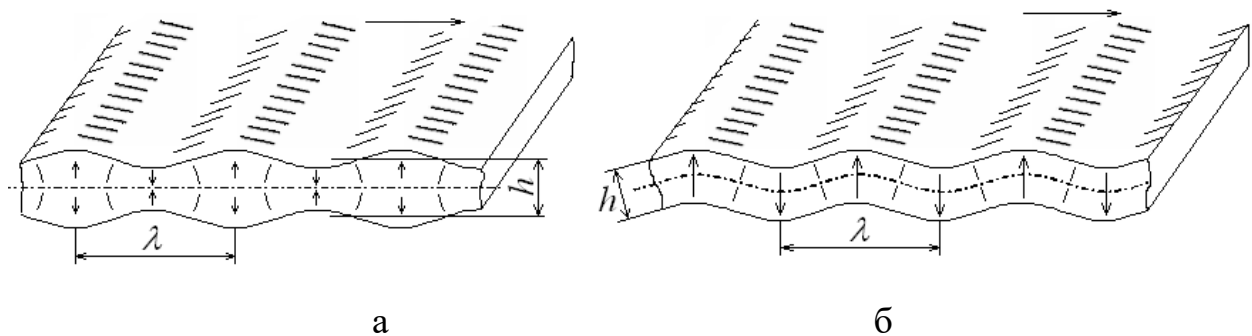


Рис. 2.2 – Симетрична (а) та антисиметрична (б) хвилі у пластині [73]

Симетрична та антисиметрична хвилі мають безліч мод [114], які визначаються співвідношеннями товщини пластини h , частоти коливання f та швидкості поперечних хвиль c_t .

Пружні константи матеріалів – модуль нормальної пружності (Юнга), модуль зсуву, коефіцієнт Пуассона постійна Ламе та густина речовини визначають швидкості поширення цих хвиль у речовині та коефіцієнт загасання. Всі типи хвиль мають різні, але по'язані між собою значення. Зокрема швидкість поздовжніх хвиль c_l та швидкість поперечних хвиль c_t пов'язані наближеним рівнянням $c_t = (0,5 \dots 0,6)c_l$, а для швидкості c_R – співвідношення $c_R \approx 0,93c_t = 0,9c_l$, для швидкості хвиль Лемба [101] (симетричних нульового порядку) маємо $c_{Ns_0} \approx 0,9c_l$ [73]. Вказані особливості можуть бути використані у фізичному експерименті з ММП для ідентифікації типу хвилі.

ММП мають малу апертуру, тому в напівбезмежному середовищі слід очікувати, що характеристика напрямленості ММП будуть мати форму близьку до напівсфери. Це підтверджують результати експериментальних досліджень поширення поверхневої хвилі (рис. 2.3).

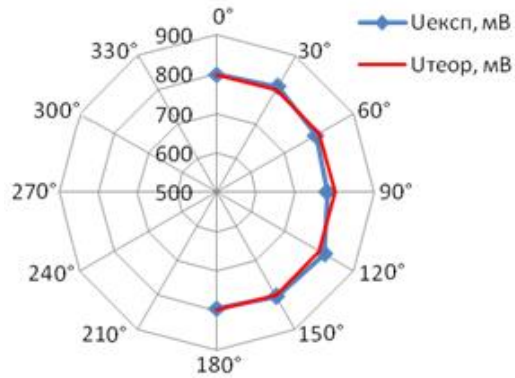


Рис. 2.3 – Діаграма напрямленості збуджених ММП поверхневих хвиль

В цілому в УЗНК, орієнтованому на використання ММП доцільно застосовувати методи відлуння, проходження та комбіновані [73]. Наочним представником методів відлуння є лунаїмпульсний метод (рис. 2.4)

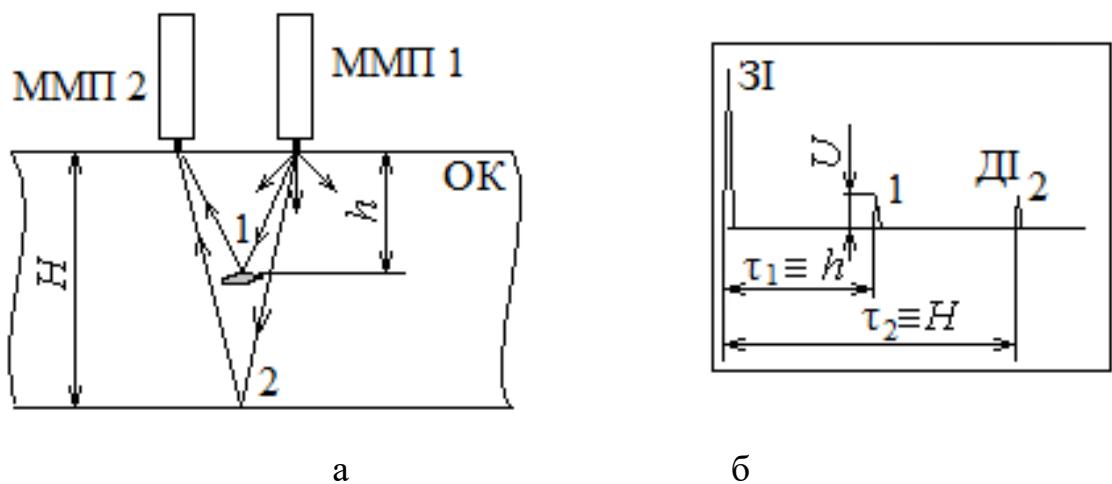


Рис. 2.4 – Схема лунаїмпульсного методу (а) та схематичний часовий ряд сигналів ММП

На рис. 2.4 позначено: ЗІ – зонduючий імпульс, ДІ – донний імпульс. В цьому методі ЗІ є носієм інформації, а саме – час затримки τ_1 містить інформацію про глибину залягання дефекту в ОК, а його амплітуда несе інформацію про розміри (відбивну здатність) дефекту.

Методи проходження (тіньовий, часовий та фазовий) ґрунтуються на аналізі хвиль, що пройшли через матеріал ОК від ММП-випромінювача до ММП-приймача (рис. 2.5).

На рис. 2.5 позначено: ГЗС – генератор зондуючих імпульсів, ЕТ – електронний тракт. В тіньовому методі (рис. 3.3а) інформаційним параметром є амплітуда сигналу. Дефект створює тінь на шляху поширення хвилі від ММП1 до ММП2.

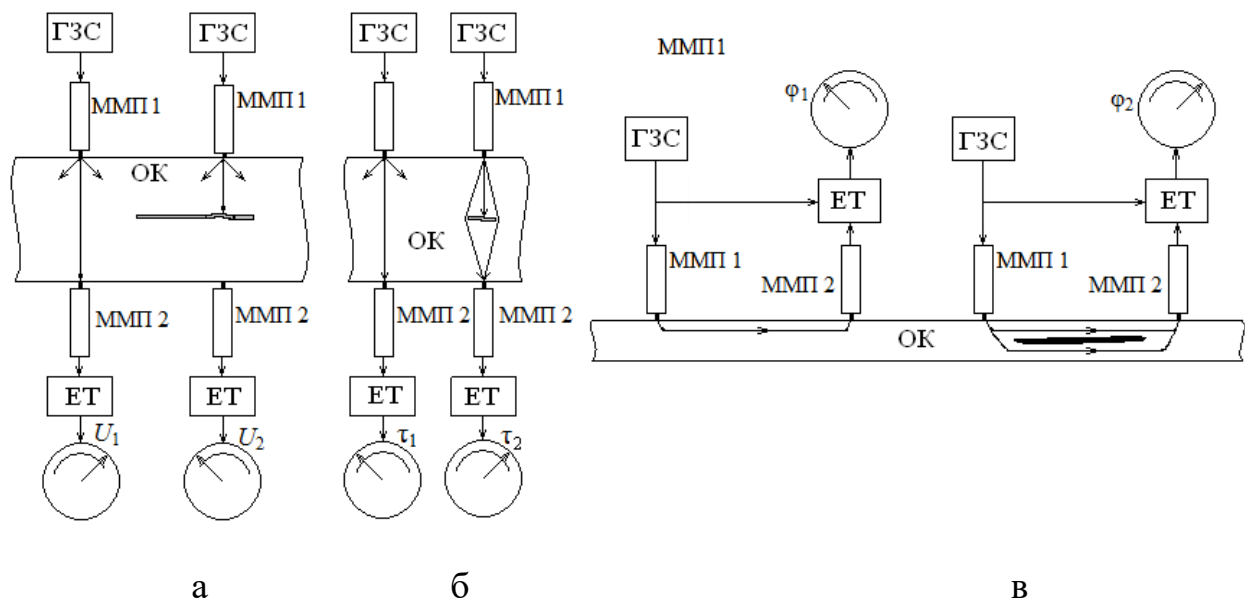


Рис. 2.5 – Ілюстрація сутності методів проходження : а – тіньового, б – часового, в – фазового

Часовий метод (рис. 2.5б) ґрунтується на визначенні часу пробігу акустичних хвиль через ОК. Внаслідок дифракції хвиль на краях тріщини час поширення сигналу від ММП1 до ММП2 збільшується. В цьому випадку інформаційним параметром є затримка сигналу на поширення в ОК. Фазовий метод (рис. 2.5в) ґрунтується на визначенні фазового зсуву, як інформаційного параметру, між випроміненим та прийнятим сигналами. За наявності дефекту, орієнтованого вздовж поверхні пластини, фазовий зсув збільшується. Певним недоліком методів проходження є неможливість визначення положення дефекту на акустичній осі.

Аналіз електроакустичного тракту в УЗНК відіграє ключову роль у розумінні процесів формування інформаційних сигналів та механізмів впливу дефектів на їх інформаційні параметри. Структура електроакустичного тракту системи «МПП – ОК – ММП» на прикладі задачі виявлення дефектів у зварному шві тонких металевих листів тіньовим методом наведена на рис. 2.6.

Електроакустичний тракт включає такі основні елементи:

- ММП-випромінювач, що перетворює енергію електричного сигналу в енергію пружних коливань;
- ОК – тонкі металеві лист зі зварним швом – середовище, в якому поширюються ультразвукові хвилі;
- ММП-приймач, що перетворює енергію пружних коливань в електричний сигнал.

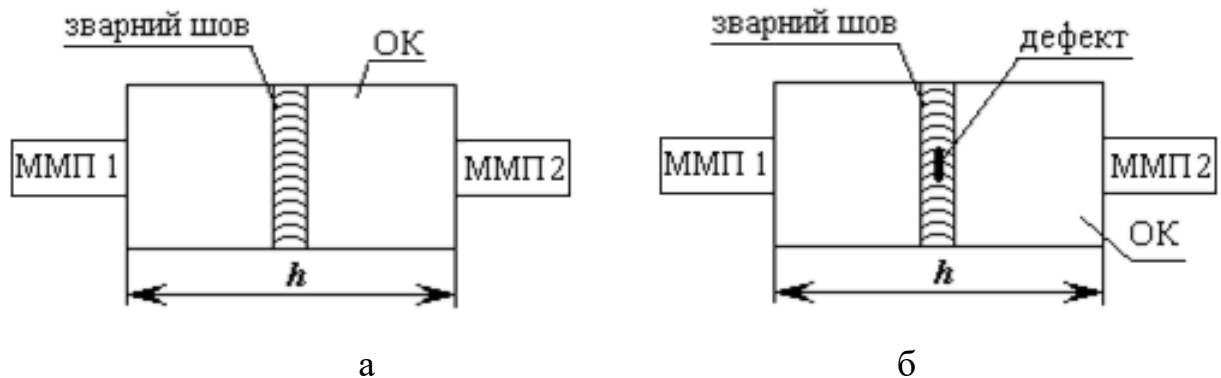


Рис. 2.6 – Структура електроакустичного тракту за відсутності (а) та наявності дефекту зварного шва

Контроль здійснюється за схемою «тандем», а ММП встановлюються на ОК на фіксованій відстані $h = (10 \dots 20)$ мм один від одного (рис. 3.5). Контрольована ділянка шву розташовується між перетворювачами.

Поширюючись в матеріалі зі зварним швом ультразвукові хвилі загасають. За наявності у зварному шві дефекту останній перекриває повністю чи частково шлях акустичній хвилі і отриманий ММП-приймачем сигнал додатково зменшується за амплітудою або зовсім зникає. Фіксація відстані h дає змогу виключити коливання амплітуди прийнятого сигналу за рахунок зміни коефіцієнта акустичного тракту на бездефектній ділянці ОК, що в свою чергу дає

можливість стабілізувати бракувальний рівень, за яким приймається рішення про наявність дефекту.

В загальному випадку коефіцієнт електроакустичного тракту визначається таким виразом [28]

$$K_{\text{е.а.т}}(\bar{p}, h) = \frac{U_{\Pi}(\bar{p}, h)}{U_B} = K_{\text{мп}} \cdot K_{\text{ат}}(\bar{p}, h), \quad (2.1)$$

де U_{Π}, U_B – відповідно амплітуда напруги на приймачі та випромінювачі; $\bar{p}$ – вектор параметрів дефекту (протяжність та глибина тріщини, еквівалентний діаметр тощо); $K_{\text{мп}}$ – коефіцієнт подвійного електромеханічного зв'язку; $K_{\text{ат}}$ – коефіцієнт акустичного тракту, який визначається коефіцієнтами згасання сигналів у хвилеводах ММП-випромінювача та ММП-приймача, коефіцієнтами проходження межі середовищ ММП-ОК і ОК-ММП, коефіцієнтом розбіжності, пов'язаним із діаграмою спрямованості ММП, коефіцієнтом послаблення сигналу в акустичному каналі ОК.

Невизначеність типу ультразвукових хвиль, які створюються в ОК, та завдань контролю суттєво ускладнюють аналітичне оцінювання коефіцієнта $K_{\text{е.а.т}}$. Зважаючи на особливості збудження ультразвукової хвилі в ММП слід очікувати, що його значення у фізичних експериментах не перевищуватиме 10^{-6} .

Розглянемо модель електричних сигналів $u_{\text{мп}}(t)$ на виході ММП-приймача, яка являє собою адитивну суміш радіоімпульсного сигналу, що двічі трансформувалася (з електричного в акустичний і навпаки) та пройшов через ділянку ОК (інформаційна складова), і реалізації гауссового шуму (шумова складова)

$$u_{\text{мп}}(t/\sigma) = K_{\text{е.а.т}} u_{\text{е}}(t - \tau) + \xi(t/\sigma), t \in [0, T_a], \quad (2.2)$$

де τ – затримка випроміненого сигналу $u_{\text{е}}(t)$ в електроакустичному тракті; $\xi(t)$ – реалізація адитивного гауссового шуму з нульовим математичним сподіванням та дисперсією σ^2 ; T_a – час аналізу сигналу, $T_a \gg f^{-1}$.

Нижче розглянуто основні етапи формування та опрацювання сигналів ММП, що відображає схема, представлена на рис. 2.7.

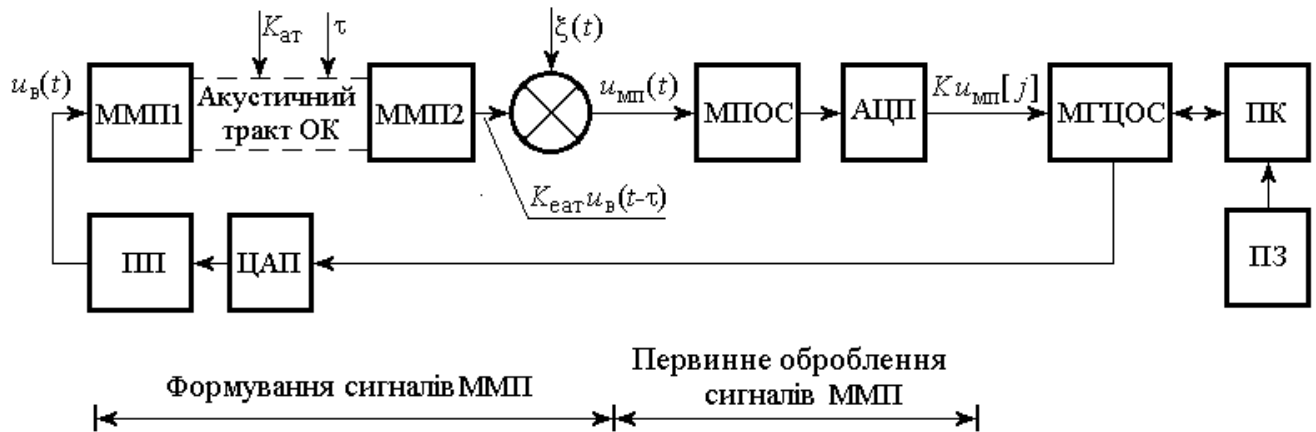


Рис. 2.7 – Структурно-логічна схема формування та опрацювання сигналів ММП [50]

На рис. 2.7 позначено: ММП1,2 – малоапертурні магнітострикційні перетворювачі, ПП – підсилювач потужності, ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач, МПОС – модуль первинного оброблення сигналів, АЦП – аналого-цифровий перетворювач, МГЦОС – модуль генерації та цифрового опрацювання сигналів, ПК – персональний комп'ютер. МГЦОС формує вибірки сигналу збудження, які перетворюються ЦАП в напругу, яка підсилюється ПП та у вигляді сигналу збудження $u_B(t)$ надходять на ММП1 – випромінювач ультразвукових коливань. Це коливання, пройшовши акустичний тракт ОК, перетворюється приймаючим перетворювачем ММП2 в електричний сигнал $K_{еат} u_B(t - \tau)$. До цього сигналу додається шумова складова – реалізація гауссового шуму, яка розглядається як інтегральний результат дії внутрішніх шумів електронних блоків та шуму електроакустичного тракту. Такому сигналу відповідає модель (2.2).

Інформаційна складова сигналу (2.2) з синусоїдним сигналом-носієм частотою f має обмежену смугу частот в околі цієї частоти. Це дає підстави вважати сигнал (3.2) вузькосмуговим, і відповідно, представити його як

$$\begin{aligned} u_{мп}(t/\sigma) &= K_{еат} U_B(t) \sin 2\pi f(t - \tau) + \xi(t/\sigma) \\ &= U_c(t) \cos\left(2\pi f t - \varphi_c - \frac{\pi}{2}\right) + \xi(t/\sigma) = \end{aligned}$$

$$= U_c(t) \cos\left(2\pi f t - \varphi_c - \frac{\pi}{2} + \varphi(t)\right) = A(t/\sigma) \cos(\Phi(t/\sigma)), t \in [0, T_a], \quad (2.3)$$

де φ_c – зсув фази, що обумовлений затримкою сигналу, $A(\cdot), \Phi(\cdot)$ – відповідно обвідна та фаза вузькосмугового сигналу, $\varphi(t) \in [0, 2\pi)$ – модуляційна складова фази вузькосмугового сигналу, викликана дією шуму. До сигналу (2.3) може бути застосовано інтегральне перетворення Гільберта [61].

2.3 Моделювання процесів генерування сигналів ММП в електроакустичних трактах засобів ультразвукового контролю

З метою більш обґрунтованого формування вимог до електронних блоків розроблюваної апаратури було проведено аналіз сигналів ММП.

В якості сигналу збудження прийнято радіоімпульс, отриманий з гармонічної напруги $\sin(2\pi f t), t \in (-\infty, \infty)$ амплітудою 1 В і частотою 0,5 МГц, який представляється моделлю виду

$$u(t, \tau) = I(\tau) \sin(2\pi f t), \tau, t \in (-\infty, \infty), \quad (2.4)$$

де T – період сигналу-носія ($T = 2$ мкс), $I(\tau)$ – індикаторна функція

$$I(\tau) = \begin{cases} 1, & \tau \in [0, 2T], \\ 0, & \tau \notin [0, 2T]. \end{cases} \quad (2.5)$$

В дискретному представленні сигнал (2.4) подається вибірками, отриманими з частотою дискретизації $f_d \gg f$ з умови отримання не менше 128 відліків на період сигналу-носія.

З урахуванням того, що довжина однієї секції котушки збудження дорівнює $\lambda_{\Pi}/4$ (тобто співставна з довжиною акустичної хвилі у хвилеводі), відносна магнітострикція δ хвилеводу визначалась як суперпозиція сукупності дій одновиткових котушок з різним просторовим положенням. В розрахунковій моделі прийнято, що котушка збудження має 32 витки, а її довжина дорівнює чверті хвилі $\frac{\lambda_n}{4} = 2,6$ мм. Далі, в розділі 4, буде показано, що такі параметри наближені до реальних параметрів ММП, а вибір кількості витків рівним $32=2^5$ значно спрощує процес аналізу отримуваних сигналів. Враховуючи ці дані та беручи до уваги, що $d(t)$, як функція часу, формується одночасно сигналами двох секцій котушок збудження, деформація хвилеводу, як функція часу, має

наступнє аналітичне представлення

$$\delta(t) = K_{\text{МП}} \left[\sum_{g=1}^{32} I \left(t - \frac{T}{128} g \right) \sin \left(2\pi f \left(t - \frac{T}{128} g \right) \right) - \sum_{g=1}^{32} I \left(t - \frac{T}{64} \left(1 + \frac{g}{2} \right) \right) \sin \left(2\pi f \left(t - \frac{T}{64} \left(1 + \frac{g}{2} \right) \right) \right) \right], \quad (2.6)$$

де $K_{\text{МП}}$ – коефіцієнт перетворення напруги в деформацію $d(t)$ (в проведених модельних експериментах прийнято $K_{\text{МП}} = 10^{-3} \text{ В}^{-1}$).

В ММП-приймачі перетворення деформації в напругу відбувається в аналогічний спосіб. Однак при цьому в аналітичному представленні перетворення необхідно додатково врахувати коефіцієнт акустичного тракту $K_{\text{а.т}} \ll 1$, який враховує загасання сигналів при проходженні межі середовищ ММП-ОК і ОК-ММП та загасання сигналів у матеріалі ОК. Цей коефіцієнт можна визначити експериментальним шляхом для певної задачі контролю.

Слід очікувати, що використання двосекційної котушки у ММП-випромінювачі та ММП-приймачі крім позитивного ефекту – заглушення впливу електромагнітних шумів і завад на інформаційні сигнали, матиме і певний негативний ефект – деяке збільшення тривалості радіоімпульсі. Цей ефект дещо зменшить роздільну здатність засосів магнітострикційного УЗНК. Його прояв доцільно дослідити в модельному експерименті.

З виконаного аналізу формування сигналів ММП також впливає необхідність у застосування в електронному блоці системи спеціальних заходів – частотних фільтрів та статистичного опрацювання сигналів, також малошумних підсилювачів сигналів ММП з коефіцієнтом підсилення не менше 2000...5000.

Особливістю моделі сигналу (2.4) є те, що вона, по-перше, враховує вплив на форму акустичного сигналу поздовжніх розмірів секцій котушок збудження, які є порівнюваними з довжиною акустичної хвилі у хвилеводі (нагадаємо, що в

розрахунковій моделі котушка збудження має 32 витки, а її довжина дорівнює $\frac{\lambda_n}{4} = 2,6$ мм.), по-друге, ця модель враховує формування акустичної хвилі двома секціями котушки збудження. Отримані аналітичні вирази достатньо громіздкі для їх безпосереднього аналізу, але зручні для проведення комп'ютерного моделювання. В цьому підрозділі виконано моделювання сигналів ММП та їх спектральний аналіз з метою унаочнення форми сигналів та аналізу їх характеристик.

В дискретному представленні сигнал (2.4) подається вибірками, отриманими з частотою дискретизації – 64 МГц (128 точок на період T сигналу-носія частотою 0,5 МГц), відповідно період дискретизації становить 15,625 нс. Аналізована ділянка сигналу обмежена інтервалом $4T = 8$ мкс. Амплітуда радіоімпульсного сигналу прийнята рівною 1 В. Моделююча програма наведена в Додатку Г. Ця програма виконує такі функції:

- розрахунок миттєвих значень вхідного електричного сигналу збудження ММП-випромінювача;
- розрахунок миттєвих значень деформації хвилевода ММП-випромінювача;
- розрахунок миттєвих значень вихідного електричного сигналу ММП-приймача (в розрахунках прийнято коефіцієнта акустичного тракту $K_{ат} = 1$);
- розрахунок спектру вихідного електричного сигналу ММП-приймача;
- візуалізацію отриманих сигналів та їх спектрів.

Оскільки основною метою моделювання є встановлення форми сигналів та їх спектрів, в моделюючій програмі прийнято $K_{mn} = 1$ В⁻¹ та $K_{ат} = 1$. Графік отриманих сигналів наведено на рис. 2.8.

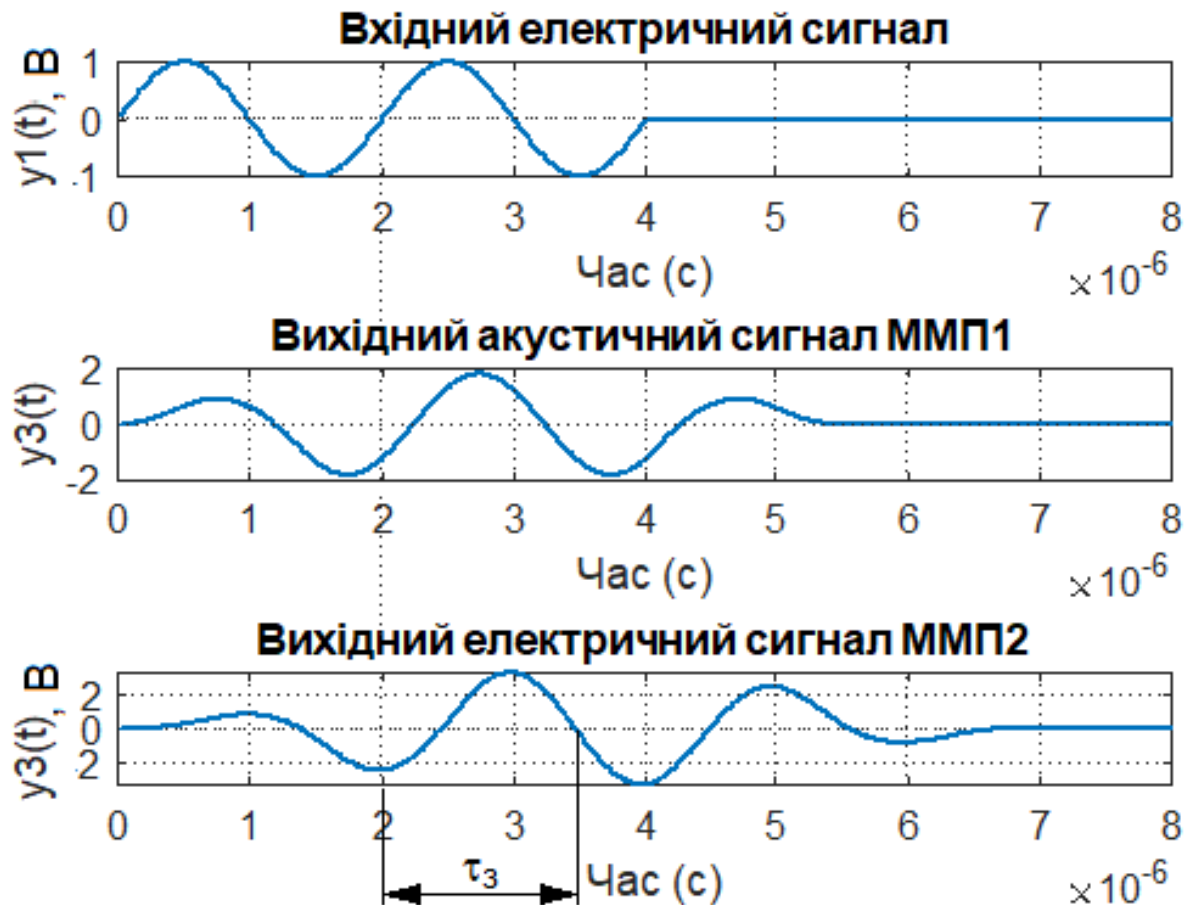


Рис. 2.8 – Графіки модельних сигналів ММП

Аналіз отриманих сигналів дає можливість зробити такі висновки:

1. За рахунок використання двосекційних котушок максимальне значення амплітуди електричного сигналу ММП-приймача збільшилось у $\sim 3,4$ рази.
2. Тривалість акустичного вихідного сигналу ММП-випромінювача збільшилась на $0,5$ періоду і становить $2,5T$
3. Тривалість електричного вихідного сигналу ММП-приймача збільшилась на 1 період і становить $3T$.
4. Перша і остання півхвилі вихідного сигналу ММП-приймача мають збільшену на величину $0,125T$ тривалість.
5. Центр обвідної прийнятого електричного сигналу ММП-приймача (див. рис.2.9) змістився в часі на величину $\tau_z \approx 0,75T$ (без урахування затримки в хвилеводах перетворювачів).

Фрагмент спектру Фур'є отриманої моделі сигналів ММП-приймача представлено на рис. 2.9. (інтервал між гармоніками спектру становить 125 кГц).

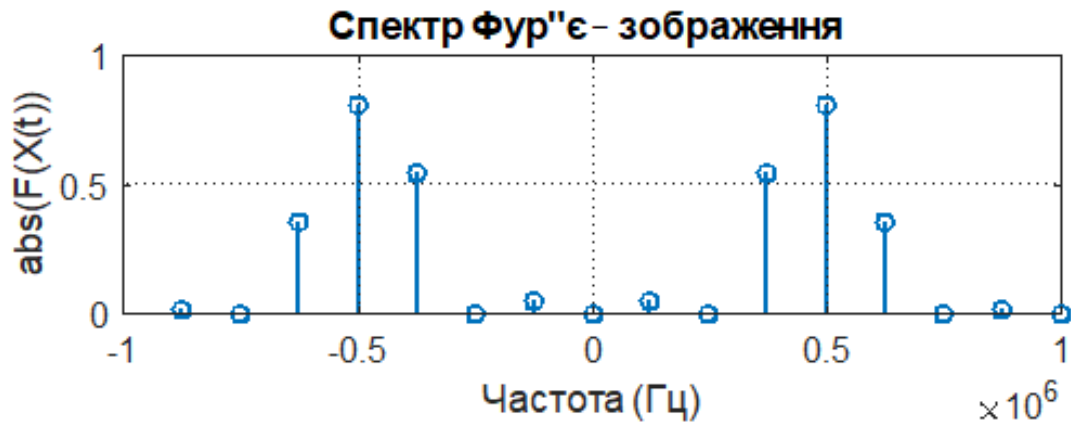


Рис. 2.9 – Фрагмент спектру Фур'є сигналів ММП-приймача

Виявлені особливості модельних сигналів ММП-приймача необхідно враховувати при оцінюванні параметрів реальних сигналів.

2.4 Розроблення та дослідження методу оцінювання інформативних параметрів сигналів ММП на основі ДПГ

В розроблюваній системі УЗНК збудження ММП-випромінювача здійснюється радіоімпульсним сигналом. Отримані відповідні ультразвукові сигналів, поширюються в акустичному тракті ОК. Параметри цих сигналів – амплітуда, фазовий зсув та часова затримка, зазнають змін внаслідок варіації фізико-механічних характеристик акустичного тракту. Завданням системи є отримання оцінок інформаційних параметрів сигналів та формування на цій основі результату контролю. Реалізації цього завдання потребує застосування відповідних методів цифрового оброблення таких сигналів. Методологія оцінювання інформаційних сигналів ММП-приймача в розроблюваній системі УЗНК ґрунтується на дискретному перетворенні Гільберта (ДПГ) [61]. Нижче узагальнено раніше отримані авторами результати [50, 62-65] стосовно використання ДПГ в НК та виконано їх адаптацію до задачі опрацювання сигналів ММП.

З урахуванням залежності коефіцієнта акустичного тракту $K_{ат}$ від вектору параметрів дефектів ОК $\bar{p}$ (розмірів дефектів типу тріщина чи порожнина,

чужорідних включень тощо) та використання в системі АЦП представлення моделі сигналу (2.7) в цифровій формі має наступний вид

$$u_{\text{мп}}[j, \bar{p}/\sigma] = A[j, \bar{p}/\sigma] \cdot \cos(\Phi[j, \bar{p}/\sigma]), j = \overline{1, J}, \quad (2.7)$$

де J – обсяг вибірки, $J = \left\lceil \frac{T_d}{T_d} \right\rceil^+$, $\lceil \cdot \rceil^+$ – позначення операції виділення цілого числа, T_d – період дискретизації аналогового сигналу в АЦП, j – номер відліку у вибірці.

З виразу (3.4) видно, що характеристики ОК впливають на дискретні значення обвідної $U[j, \bar{p}/\sigma]$ та фази $\Phi[j, \bar{p}/\sigma]$ сигналу ММП. Крім того ці значення зазнають впливу шумової компоненти сигналу з дисперсією σ^2 . Хоча взаємозв'язок характеристик ОК з характеристиками сигналу ММП у явній формі в більшості випадків встановити неможливо, саме вибірки $U[j, \bar{p}/\sigma]$ та $\Phi[j, \bar{p}/\sigma]$ є носіями інформації про властивості ОК.

Визначення вибірок $U[j, \bar{p}/\sigma]$ та $\Phi[j, \bar{p}/\sigma]$ здійснюється за допомогою ДПГ, яке реалізує оператор $\mathbf{H}_o$ і забезпечує отримання гільберт-образу вибірки $u_{\text{мп}}[j, \bar{p}/\sigma]$.

Значення дискретних вибірок обвідної і фази сигналу ММП-приймача для всіх точок вибірки обчислюються згідно :

$$A[j, \bar{p}/\sigma] = \sqrt{u_{\text{мп}}^2[j, \bar{p}/\sigma] + \tilde{u}_{\text{мп}}^2[j, \bar{p}/\sigma]}, \quad (2.8)$$

$$\Phi[j, \bar{p}/\sigma] = \arctan \frac{\tilde{u}_{\text{мп}}[j, \bar{p}/\sigma]}{u_{\text{мп}}[j, \bar{p}/\sigma]} + L(u_{\text{мп}}[j, \bar{p}/\sigma], \tilde{u}_{\text{мп}}[j, \bar{p}/\sigma]) \quad (2.9)$$

де L – оператор розгортання фазової характеристики сигналу за межі інтервалу $[-0,5\pi, 0,5\pi]$, тобто інтервалу однозначного визначення функції $\arctg$ [62-65].

ДПГ дає змогу отримати вибірки обвідної та фази сигналів ММП під час сканування поверхні ОК з частотою $F_d \gg f$. Це, по-перше, дає змогу відслідкувати динаміку зміни характеристик сигналу ММП навіть протягом періоду сигналу-носія, по-друге, застосувати відповідні детерміновані та статистичні методи опрацювання цих функцій, що необхідно для зменшення впливу шумової складової на точність їх визначення.

З послідовностей $A[j, \bar{p}/\sigma]$ та $\Phi[j, \bar{p}/\sigma]$ можуть бути отримані функція амплітудної модуляції сигналу, її параметри, індекс модуляції, функція фазової

модуляції, яка визначається як різниця фазових характеристик сигналу ММП та сигналу збудження

$$\varphi[j, \bar{p}/\sigma] = \Phi[j, \bar{p}/\sigma] - 2\pi f j T_d \quad (2.9)$$

У ряді завдань УЗНК актуальним може виявитись завдання оцінювання миттєвої частоти сигналів, яка в дискретні моменти часу може бути визначена безпосередньо з дискретної фази сигналу ММП згідно з виразом

$$f[j, \bar{p}/\sigma] = \frac{\Phi[j, \bar{p}/\sigma] - \Phi[(j-1), \bar{p}/\sigma]}{2\pi T_d}, 1 \leq j \leq J - 1. \quad (2.10)$$

За необхідності (до прикладу, при реалізації фазового методу УЗНК) фазовий зсув прийнятого сигналу відносно випроміненого можна виконати згідно з виразом

$$\varphi[j, \bar{p}/\sigma] = \Phi[j, \bar{p}/\sigma] - \Phi_s[j, \bar{p}/\sigma], \quad (2.11)$$

де індексами «в» позначено фазу випроміненого сигналу.

В разі необхідності для зменшення впливу шумової складової на результат оцінювання інформаційних параметрів сигналів можуть бути застосовані методи фільтрації сигналу, або методи статистичного згладжування результатів оцінювання миттєвих значень обвідної та фази.

2.5 Моделювання процесів опрацювання сигналів ММП та оцінювання їх інформативних параметрів

Оцінювання параметрів інформаційних сигналів в системі здійснюється програмним шляхом. Нижче наведено результати моделювання процесу оцінювання параметрів сигналів ММП, який ґрунтується на використанні ДПГ.

На рис. 2.10. представлена характерна осцилограма реального сигналу збудження $u_z(t)$ та сигналу на виході ММП-приймача $u_{мп}(t)$ (у відносних одиницях), отримана при поширенні ультразвукового сигналу в металевому ОК на невелику відстань.

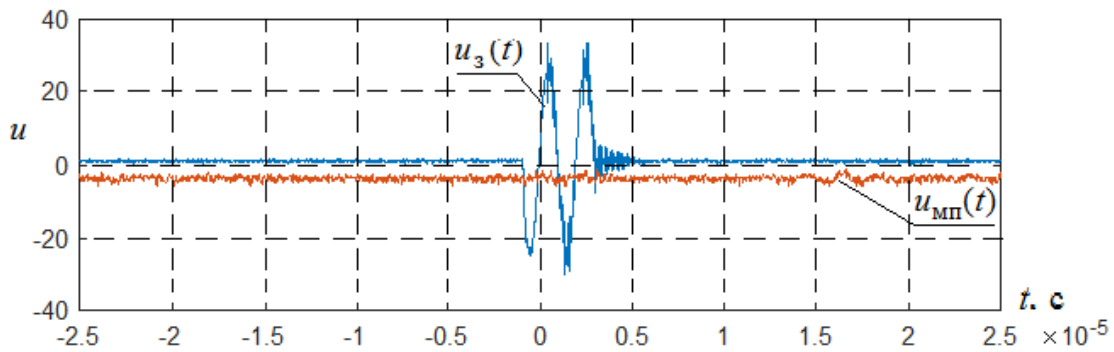


Рис. 2.10 – Графіки сигналу збудження $u_3(t)$ та сигналу на виході ММП-приймача $u_{\text{мп}}(t)$

Інформаційна складова затримана на ~ 15 мкс відносно зондуєчого сигналу $u_3(t)$, тривалість радіоімпульсу збільшилась приблизно на 1 період внаслідок особливостей формування сигналів в ММП, амплітуда сигналу значно зменшилась, і крім того в сигналі $u_{\text{мп}}(t)$ з'явилась суттєва шумова складова. Всі ці особливості враховані при моделюванні та оцінюванні інформаційних параметрів сигналу $u_{\text{мп}}(t)$. Вихідні параметри для моделювання:

- частота сигналу-носія дорівнює 0,5 МГц (період $T = 2$ мкс);
- частота дискретизації – 64 МГц (період дискретизації – 15,625 нс);
- тривалість радіоімпульсу – 4 мкс (2 періоди сигналу-носія);
- час аналізу сигналу обмежений інтервалом $3,5T = 7$ мкс
- амплітуда радіоімпульсного сигналу представлена у відносних одиницях і дорівнює 1;
- середнє квадратичне значення гауссового шуму $\sigma = 0,1$, а його математичне сподівання дорівнює нулю.

Отриманий модельний сигнал згідно з обраними параметрами представлений на рис. 2.11.

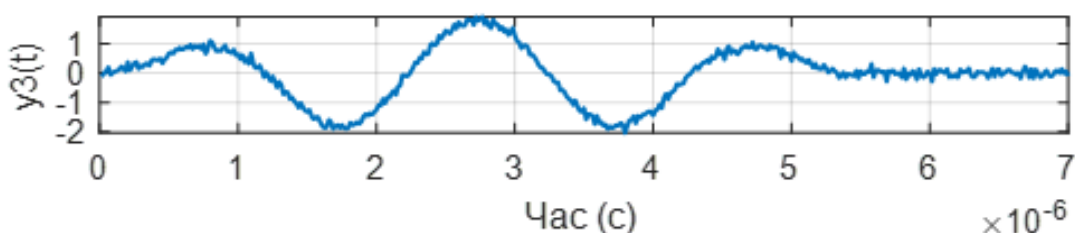


Рис. 2.11 – Графік змодельованого сигналу $u_{\text{мп}}(t/\sigma)$

Основним завдання моделюючої програми є формування обвідної і фази сигналу $u_{\text{МП}}(t/\sigma)$. З цією метою за допомогою команди *hilbert* отримують аналітичний сигнал [61] виду

$$\dot{z}_{\text{МП}}(t/\sigma) = u_{\text{МП}}(t/\sigma) + j\tilde{u}_{\text{МП}}(t/\sigma), \quad (2.12)$$

де $\tilde{u}_{\text{МП}}(t/\sigma)$ – Гільберт-образ аналізованого сигналу $u_{\text{МП}}(t/\sigma)$; $j = \sqrt{-1}$

Обвідна сигналу обчислюється за формулою (2.8). Отримані графіки сигналів $u_{\text{МП}}(t/\sigma)$ (синя крива), $\tilde{u}_{\text{МП}}(t/\sigma)$ (червона крива) та обвідної (жовта крива) наведено на рис. 2.12. За цим графіком можна визначити миттєві значення обвідної, відслідкувати динаміку її зміни та визначити її максимальне значення.

Фаза сигналу визначається в два етапи. На першому оцінюється складова фази (2.6) в межах інтервалу $(-\pi, \pi)$, що пов'язано з обмеженим інтервалом представлення функції арктангенса. Ця процедура виконується командою *atan2*, яка обраховує обернену функцію тангенса від елементів двох зв'язаних масивів – значень сигналу ММП-перетворювача та його Гільберт-образу (тобто його копії зсунутої по фазі на кут $0,5\pi$). Графік цієї функції (нерозгорнутої фази) наведено на рис. 2.12б.

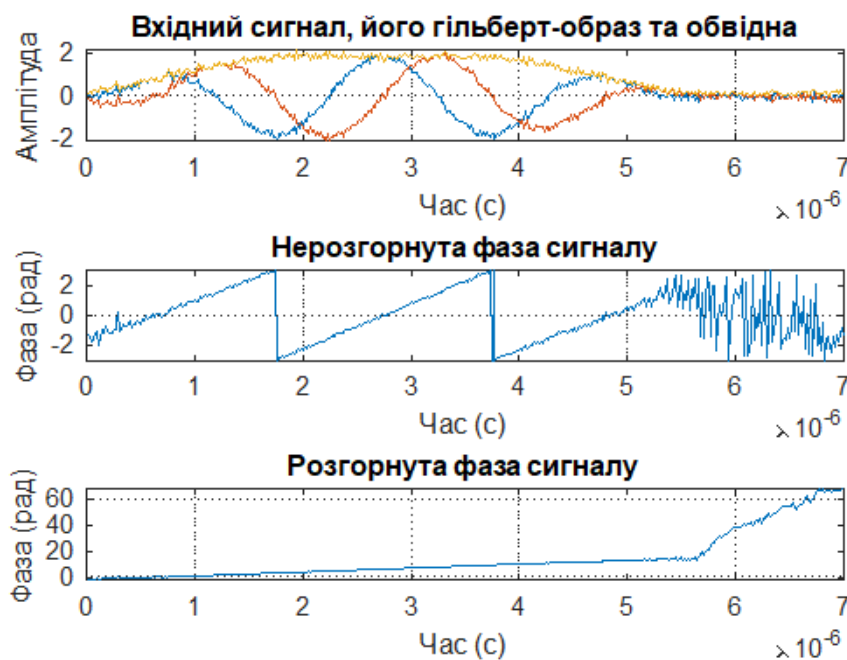


Рис. 2.12 – Графіки сигналів $u_{\text{МП}}(t/\sigma)$, $\tilde{u}_{\text{МП}}(t/\sigma)$ та їх обвідної (а), нерозгорнутої (б) та розгорнутої (в) фази сигналу

Процедура розгортання фази спрямована на реалізацію оператора $\mathbf{L}$, який входить другою складовою у формулі (2.4) розгорнутої фази. По суті цей оператор формує ступінчасту функцію з величиною сходинок 2π [18]. Ця процедура виконується командою *unwrap*. Графік розгорнутої фази сигналу $u_{\text{мп}}(t/\sigma)$ наведено на рис.2.12в. В межах існування радіоімпульсу цей графік близький до прямої лінії, кут нахилу якої до осі часу визначається частотою сигналу-носія. За межами радіоімпульсу крива графіку визначається шумовою складовою сигналу, яка приводить до хаотичної зміни фази, а її лінійний тренд має кут нахилу значно більший за попередню ділянку. Цю властивість фази можна використовувати для розроблення фазових методів виявлення радіосигналів за присутності шуму та за малих значень відношення сигнал/шум.

В цілому, застосування ДПГ для визначення інформаційних характеристик сигналів ММП – обвідної та фази, дає змогу отримати вибірки цих характеристик значних обсягів і, таким чином, створює передумову для застосування статистичних методів їх опрацювання з метою підвищення показників якості результатів УНК.

2.6 Аналіз швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль в пластині при використанні магнітострикційного УЗНК

Для аналізу швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль в пластині при використанні магнітострикційного УЗНК проведено аналіз хвиль Лемба, які поширюються в лінійній, однорідній та ізотропній пружній пластині з вільними від напружень верхньою та нижньою поверхнями [36, 62]) і з довжиною та шириною, що значно перевищують її товщину [39]. Хвилі виникають внаслідок конструктивної інтерференції відбиттів поздовжніх і поперечних хвиль від обох поверхонь пластини, якщо довжина використовуваної хвилі перевищує товщину пластини (можливе співвідношення з [13] становить $2h \leq 3\lambda$, де $2h$ — загальна товщина пластини, а λ — довжина хвилі).

В залежності від руху частинок відносно середини пластини, хвилі Лемба можна класифікувати на антисиметричні та симетричні моди (позначаються A_m

і S_m та відповідно, де $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ вказує на «порядок»). Антисиметричні моди зазвичай характеризуються позаплощинним зміщенням частинок (у поперечному напрямку), тоді як симетричні моди мають переважно зміщення частинок у площині (у поздовжньому напрямку) [6, 13, 43].

Для однорідної, ізотропної пружної пластини з вільними від напружень межами та поперечними розмірами, що значно перевищують товщину (значення якої становить $2h$), характеристичні рівняння для направленої руху симетричних хвиль Лемба можуть бути виражені рівнянням (2.13) [1, 10, 64, 65]:

$$4k^{2pq} \sin(ph) \cos(qh) + (k^2 - q^2)^2 \sin(qh) \cos(ph) = 0 \quad (2.13)$$

а для антисиметричного руху хвиль Лемба — рівнянням (2.14):

$$4k^{2pq} \sin(qh) \cos(ph) + (k^2 - q^2)^2 \sin(ph) \cos(qh) = 0 \quad (2.14)$$

$$p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2, \quad q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2 \quad (2.15)$$

де $k = \frac{\omega}{c_p}$ — хвильове число, $\omega = 2\pi f$ — кутова частота, c_p — фазова швидкість, а c_L та c_T — відповідно поздовжня та поперечна швидкості матеріалу. Характеристичні рівняння (2.13) та (2.14) також відомі як дисперсійні рівняння для хвиль Лемба або рівняння Релея-Лемба [6].

Для аналізу дисперсійних кривих фазової швидкості хвиль Лемба для сталюї плити СтЗсп з параметрами $c_L = 5900$ м/с, $c_T = 3200$ м/с та товщиною $2h$, яка дорівнювала 10 мм, 5 мм, 1 мм побудовані відповідні залежності в середовищі MathLab. Дисперсійні криві фазової швидкості, на яких з'являються різні моди (антисиметричні позначені «червоним», симетричні «блакитним»), наведено на рисунку 2.13 -2.15.

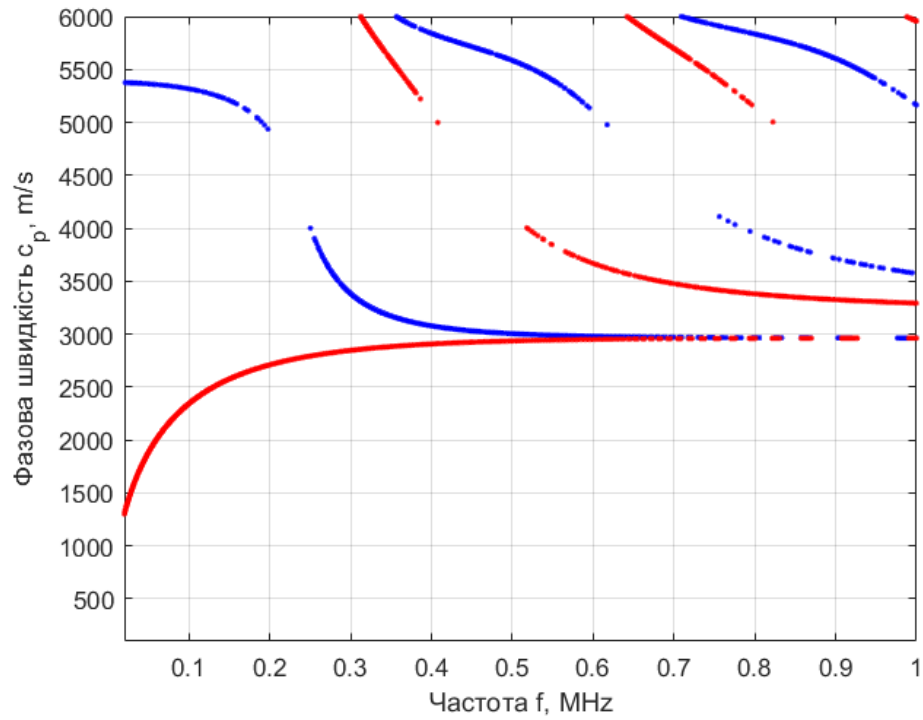


Рисунок 2.13 Дисперсійні криві для сталюї плити СтЗсп з параметрами $c_L = 5900$ м/с, $c_T = 3200$ м/с та товщиною 10 мм.

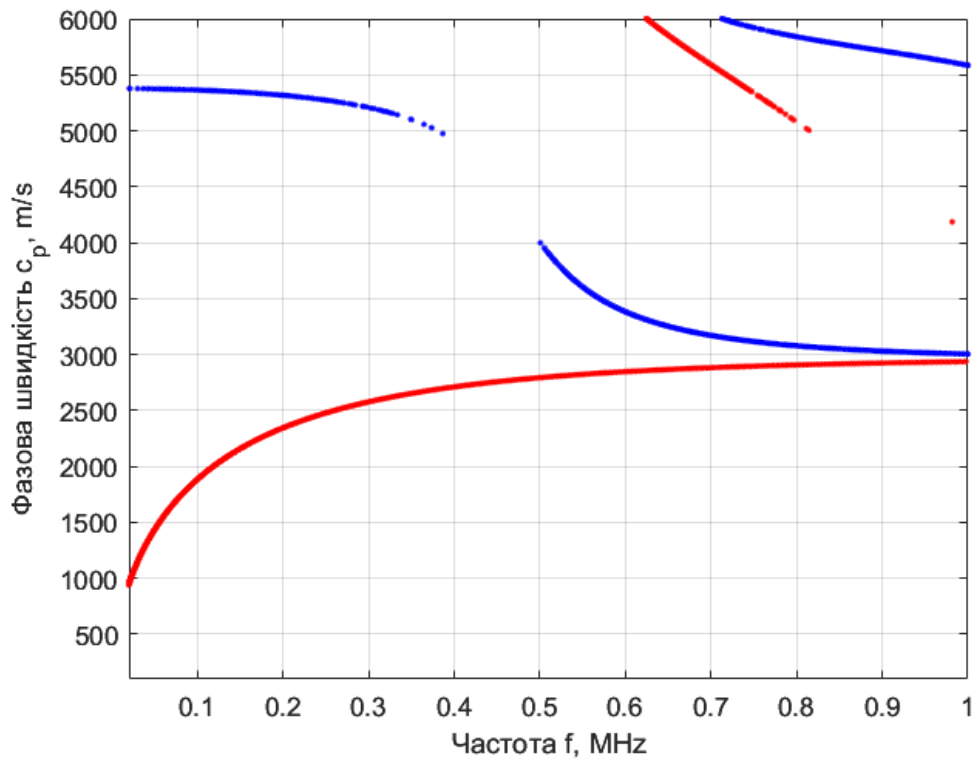


Рисунок 2.14 Дисперсійні криві для сталюї плити СтЗсп з параметрами $c_L = 5900$ м/с, $c_T = 3200$ м/с та товщиною 5 мм.

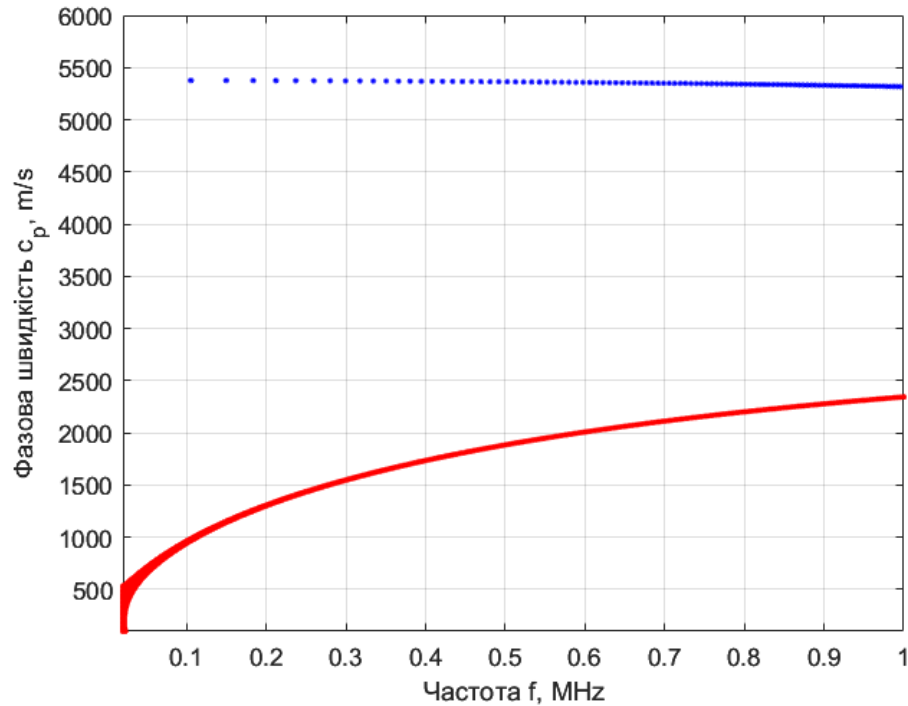


Рисунок 2.15 Дисперсійні криві для сталюї плити СтЗсп з параметрами $c_L = 5900$ м/с, $c_T = 3200$ м/с та товщиною 1 мм.

Для дисперсійних кривих симетричних мод існує горизонтальна ділянка, де фазова швидкість наближається до швидкості квазіповерхонкової хвилі, що показано на рисунку 2.13 [62]. Для всіх частот існують дві моди — основні моди A_0 та S_0 . На високих частотах обидві ці моди наближаються до швидкості хвилі Релея для даної пластини, тоді як решта мод хвиль Лемба (A_m , S_m , де $m > 0$) наближаються до швидкості поперечної хвилі в пластині [14]. Ці моди вищого порядку мають критичні частоти (частоти відсікання), на яких їхня фазова швидкість прямує до нескінченності [61].

Для оцінки і проведення верифікації швидкості розповсюдження в зразках проведено визначення групової швидкості. Групова швидкість c_g (2.16) можна розглядалась як швидкість, з якою поширюється хвильовий фронт кожної моди [64], і вона визначається як [18, 66, 67]:

$$c_g = \frac{c_p^2}{c_p - f \frac{\partial c_p}{\partial f}} \quad (2.16)$$

На рисунках 2.16 та 2.17 наведені дисперсійні криві фазової і групової швидкості для сталюї плити Ст3сп з параметрами $c_L = 5900$ м/с, $c_T = 3200$ м/с з товщиною 0.5 та 1 мм.

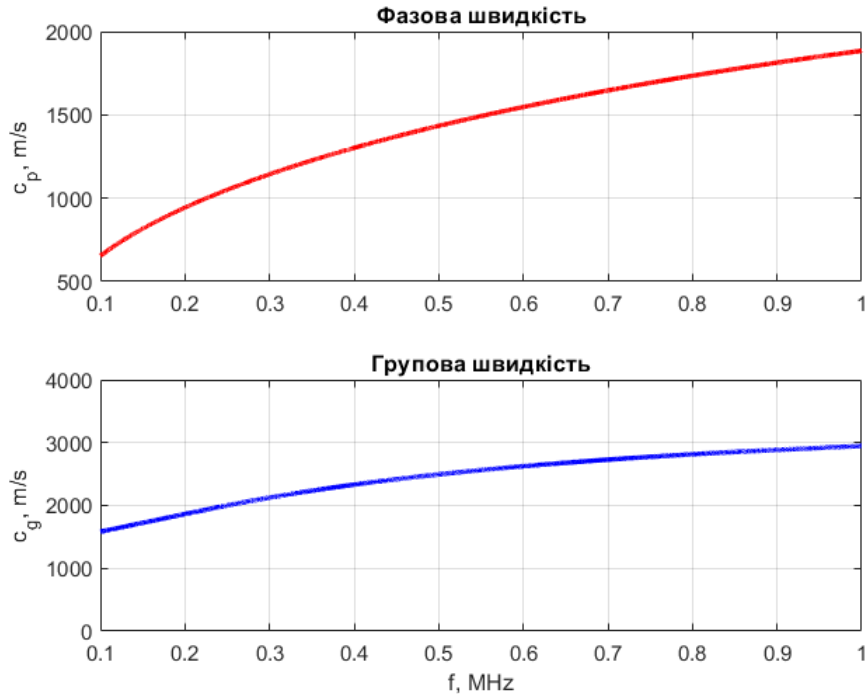


Рисунок 2.16 Дисперсійні криві фазової і групової швидкості для сталюї плити Ст3сп з параметрами $c_L = 5900$ м/с, $c_T = 3200$ м/с та товщиною 0.5 мм.

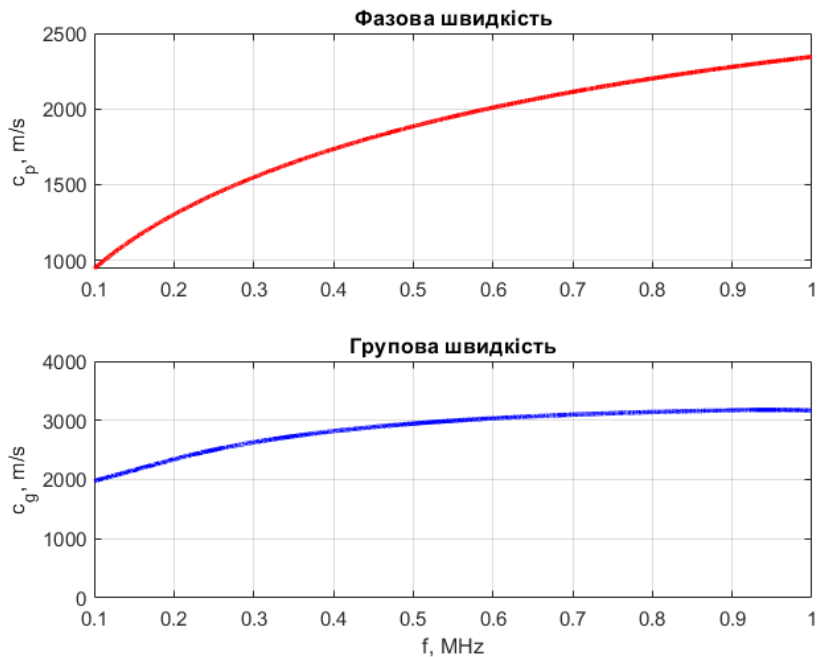


Рисунок 2.17 Дисперсійні криві фазової і групової швидкості для сталюї плити Ст3сп з параметрами $c_L = 5900$ м/с, $c_T = 3200$ м/с та товщиною 0.5 мм.

Верифікація групових швидкостей розповсюдження для пластин 0.5 мм та 1 мм наведена в розділі 4.

2.7 Розроблення вимог до структури апаратних та програмних засобів ультразвукового магнітострикційного УЗНК

Аналіз особливостей використання ММП для збудження ультразвукових коливань в ОК, їх поширення в ОК та перетворення ультразвукових коливань в ММП-приймачі в електричні сигнали дав змогу сформулювати основні вимоги до структури апаратних та програмних засобів магнітострикційного УЗНК.

1. До складу структури апаратних засобів повинні входити ММП, генеруючий модуль, який виробляє сигнали збудження ММП-випромінювача, модуль попереднього оброблення сигналів ММП-приймача, АЦП та ПК.

2. ММП повинні:

- підтримувати роботу з сигналом-носієм частотою 0,5 МГц;
- мати діаметр хвилевод не більше 1 мм.

3. Генеруючий модуль призначений для вироблення радіоімпульсного сигналу, який надходить на ММП-випромінювач. Він повинен задовольняти таким вимогам:

- мати можливість регулювання тривалості, періоду слідування та рівня радіоімпульсного електричного сигналу;
- мати вихідний імпеданс не менше 10 Ом.
- мати можливість змінювати амплітуду вихідного сигналу в межах 0...10 В;
- забезпечити частоту сигналу-носія для збудження ММП 0,5 МГц;
- мати можливість регулювати кількість періодів заповнюючого коливання у радіоімпульсі в межах 1...8 періодів.

4. Модуль попереднього оброблення сигналів ММП-приймача повинен:

- забезпечувати підсилення сигналів з коефіцієнтом не менше 5000;
- забезпечувати робочу смугу частот 0,1...5 МГц;
- мати вхідний електричний імпеданс не менше 1 кОм.

5. Модуль АЦП повинен:

забезпечувати частоту дискретизації сигналів не менше 100 МГц;

- мати розрядність не менше 10 двійкових розрядів.

6. Програмний модуль повинен підтримувати наступні функції:

- отримання від АЦП цифрових даних;

- формування вибірки даних для подальшого опрацювання;

- фільтрація отриманого сигналу з метою знешумлення;

- оцінювання таких параметрів прийнятого сигналу, як амплітуда та час затримки в ОК;

- аналіз та відображення отриманої інформації;

- забезпечувати зручний інтерфейс та інтерактивний режим управління параметрами збору та візуалізації отриманих сигналів та їх параметрів;

- збереження результатів контролю.

2.8 Висновки до розділу 2

Проведено аналіз факторів впливу на достовірність неруйнівного ультразвукового контролю з використанням малоапертурних магнітострикційних перетворювачів.

Виконано аналіз пружних хвиль, що можуть збуджуватись в системах УНК з ММП – це об'ємні поздовжні та поперечні хвилі, що поширюються у напівбезмежних середовищах, поверхневі хвилі, що поширюються на межі двох напівбезмежних середовищ, а також нормальні хвилі (хвилі Лемба) [104, 109] симетричні та антисиметричні, що поширюються у пластинах.

Зазначено, що найбільш прийнятними для використання в системах УНК з ММП є лунаїмпульсний метод та методи проходження – тіньовий, часовий та фазовий.

Проаналізовано структуру електроакустичного тракту системи «МПП – ОК– ММП». Зазначено, що внаслідок малого коефіцієнту електроакустичного тракту ($10^{-5} \dots 10^{-6}$) електронний тракт системи контролю повинен забезпечувати роботу с електричними сигналами малих рівнів та можливість заглушення

шумів, які супроводжують процес отримання та оброблення інформаційних сигналів.

Запропоновано математичну модель сигналів ММП у вигляді вузькосмугового процесу, яка допускає застосування ДПГ для визначення інформаційних характеристик сигналу. Такими характеристиками, в залежності від обраного методу УЗНК, можуть бути обвідна, фаза, фазовий зсув та затримка сигналу в акустичному тракті. Застосування ДПГ дає змогу не тільки отримати миттєві значення характеристик сигналів, але й отримати вибірки цих характеристик значних обсягів, що уможливорює застосування до них статистичних методів згладжування.

Грунтуючись на аналізі особливостей формування сигналів ММП сформульовано вимоги до структури апаратних та програмних засобів ультразвукового магнітострикційного УЗНК

Запропоновано математичну модель формування акустичних сигналів ММП- випромінювачів, в якій враховано кінцеві розміри котушок збудження перетворювачі. Показано, що разом з підвищенням рівня сигналів відбувається деяке збільшення в часі тривалості радіоімпульсу, що необхідно враховувати при оцінюванні часових затримок поширення сигналів в ОК.

Розглянуто задачу оцінювання інформаційних характеристик сигналів ММП. Обґрунтовано застосування дискретного перетворення Гільберта для розв'язання цієї задачі, розроблено та апробовано відповідне програмне забезпечення в середовищі MatLab. Відмічено, що ДПГ дає змогу отримати вибірки інформаційних характеристик сигналів ММП – обвідної та фази, значних обсягів що створює передумову для застосування статистичних методів їх опрацювання та підвищення на цій основі показників якості результатів УЗНК.

На основі математичного моделювання в середовищі MATLAB встановлено закономірності фазових і групових швидкостей симетричних та антисиметричних мод хвиль Лемба в зразках сталевих пластинах різної товщини.

РОЗДІЛ 3 АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МАГНІТОСТРИКЦІЙНОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

3.1. Розроблення структури апаратних засобів ультразвукового магнітострикційного неруйнівного контролю з ММП

Структура ультразвукової магнітострикційної системи неруйнівного контролю з ММП, призначеної для збирання, опрацювання та аналізу даних контролю, а також для візуалізації отриманих результатів представлена на рис. 3.1. Наведена структура являє собою логічне поєднання апаратних і програмних засобів об'єднаних в єдину систему з метою реалізації завдань УЗНК з використанням ММП.

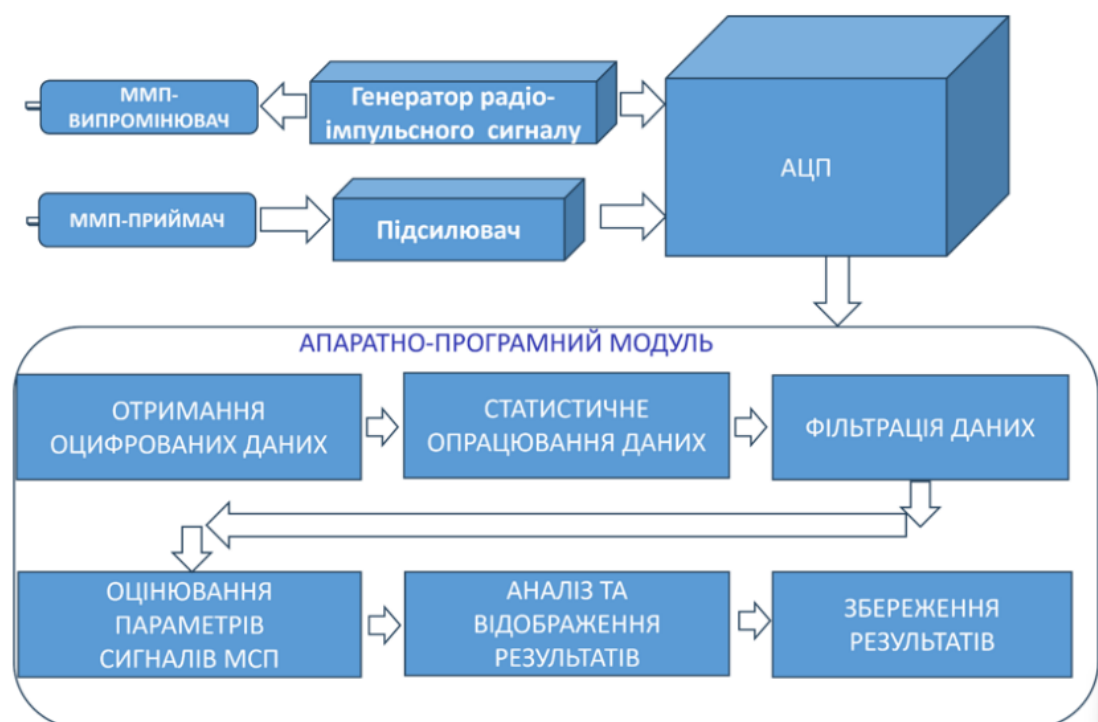


Рис. 3.1 – Структура системи ультразвукового магнітострикційного неруйнівного контролю з ММП

Представлена структура побудована на основі вимог до апаратних та програмних засобів ультразвукового магнітострикційного УЗНК, викладених в розділі 2

Апаратна частина системи складається з випромінюючого та приймаючого ММП, закріплених у спеціальному тримачі, генератора радіоімпульсного сигналу, підсилювача, аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та реалізованого на ПК апаратно-програмного модуля.

Генератор радіоімпульсного сигналу формує електричний радіоімпульсний сигнал збудження із заданими параметрами (частотою сигналу-носія, кількістю періодів та періодом повторення), який в ММП-випромінювачі перетворюється у поздовжню деформацію магнітострикційного хвилевода і у вигляді пружних коливань надходить у ОК. Генератор у своєму складі має такі модулі:

- модуль DDS цифрового синтезатора сигналів;
- модуль АМР підсилювача потужності для збудження магнітострикційного перетворювача;
- модуль CPU пристрою управління.

Підсилювач сигналів забезпечує попереднє підсилення сигналів ММП-приймача з метою узгодження їх амплітуди з динамічним діапазоном перетворення АЦП, який формує на своїх виходах цифровий сигнал. Коефіцієнт підсилення повинен змінюватись в діапазоні 500.....5000, а смуга робочих частот охоплює інтервал 0,1....5 МГц.

Оцифровані дані далі передаються з виходу АЦП до апаратно-програмного модуля, що програмним шляхом виконує формування вибірки, фільтрацію даних, їх статистичне опрацювання (усереднення), аналіз інформаційних параметрів, відображення результатів контролю, їх збереження та складання протоколу контролю.

Крім цього до складу апаратної частини входять допоміжні модулі (на рис.3.1 не показані):

- модуль управління дисплеєм та клавіатурою;
- модуль блоку живлення (формує стабільні постійні напруги, необхідні для живлення електронних компонентів).

Умови експлуатації системи мають відповідати наступним вимогам:

- температура оточуючого середовища від 10°C до 35°C;

- відносна вологість повітря $(50 \pm 10)\%$ за температури 25°C ;
- атмосферний тиск від 84 до 107 кПа (від 650 до 800 мм рт.ст.).

Параметри електричної мережі живлення:

- напруга (230 ± 23) В;
- частота $(50 \pm 0,5)$ Гц.

Можливості апаратної складової системи в частині опрацювання сигналів доповнені рядом функцій, реалізованих програмним шляхом на основі використання цифрових методів оброблення сигналів. Реалізація значної частини функцій з оброблення, аналізу та візуалізації експериментальних даних програмним шляхом дає можливість модернізувати систему за рахунок модифікації алгоритмів опрацювання вимірювальної інформації без зміни її апаратної частини.

3.2. Розроблення програмних засобів ультразвукового магніострикційного неруйнівного контролю з ММП

Значна частина функцій засобу магніострикційного УЗНК була реалізована у вигляді прикладного програмного забезпечення (ПЗ). ПЗ є важливою складовою системи УЗНК, оскільки дає змогу автоматизувати процеси отримання, оброблення, збереження та візуалізації даних вимірювань і контролю. Простота використання ПЗ досягається за рахунок розробленого зручного інтерфейсу користувача. Крім того, ПЗ дає змогу реалізувати і порівнювати між собою різні алгоритми опрацювання сигналів ММП.

Розроблене ПЗ системи УНК призначене для автоматизації процесу аналізу вимірюваної інформації, отриманої в процесі виконання контролю досліджуваних зразків магніострикційним методом.

У програмі реалізовано три режими дослідження:

- А. Визначення часу затримки імпульсу в ММП;
- Б. Визначення швидкості поширення ультразвукової хвилі в матеріалі ОК;
- В. Визначення параметрів ультразвукової хвилі після проходження ОК.

Третій режим (В) використання програмного забезпечення дає змогу визначити такі інформативні параметри УЗНК:

- час затримки між випромінюваним і першими прийнятим радіоімпульсами;
- відстань, що пройшов у матеріалі ОК перший прийнятий радіоімпульс;
- амплітуду прийнятого радіоімпульсу.

В розробленому програмному забезпеченні підвищення точності визначення інформативні параметри УЗНК реалізовано шляхом врахування конструктивних особливостей магнітострикційних датчиків, особливостей їх розміщення на контрольованому зразку, а також властивостей матеріалу зразка. З цією метою оператор може вносити і змінювати такі дані:

- час затримки поширення імпульсу в ММП;
- відстань між точками контакту ММП на поверхні ОК;
- швидкість поширення імпульсу в матеріалі ОК.

Крім того, ПЗ надає можливість досліджувати швидкість поширення сигналів в матеріалі ОК (режим 2) і час затримки поширення імпульсу в ММП (режим 3). Використання цих режимів дає змогу автоматизувати процес дослідження властивостей різних матеріалів і характерних особливостей ММП. Автоматизація цих досліджень дасть можливість уточнити вхідні дані експериментів на місці їх проведення, і на цій основі підвищити точність вимірювань параметрів та характеристик ОК.

Реалізація програмного забезпечення. В якості платформи для реалізації обчислювальних алгоритмів у вигляді прикладного програмного забезпечення було обрано графічне програмне середовище LabVIEW фірми National Instruments [78]. Це середовище має можливість для реалізації обчислювальних алгоритмів у вигляді блок-схеми, де етапи виконання алгоритму задаються у вигляді блоків (компонентів) з використанням графічних значків. Ці блоки реалізують повну функціональну частину алгоритму. Інформація між блоками

передається через провідники інформації – потоки даних. Також середовище LabVIEW містить віджети для реалізації графічного інтерфейсу користувача.

Віджети є, по-перше, джерелами даних для обчислювальних алгоритмів, по-друге, керуючими сигналами, що визначають послідовність операцій. Також, є ще один тип віджетів – індикатори, що дають змогу відображати результати розрахунків.

Графічний інтерфейс (фронтальна панель) і блок-схема, що представляє потоки даних та алгоритми їх опрацювання, об'єднуються в середовищі LabVIEW в так звані віртуальні прилади (ВП), на основі яких будується ПЗ засобів вимірювання. ПЗ розроблюваної системи ультразвукового магнітострикційного неруйнівного контролю з ММП реалізовано у вигляді ВП з фронтальною панеллю, яка є графічним інтерфейсом користувача та основною блок-схемою, що формує потік даних системи. Структура розробленого програмного забезпечення системи наведена на рис. 3.2.

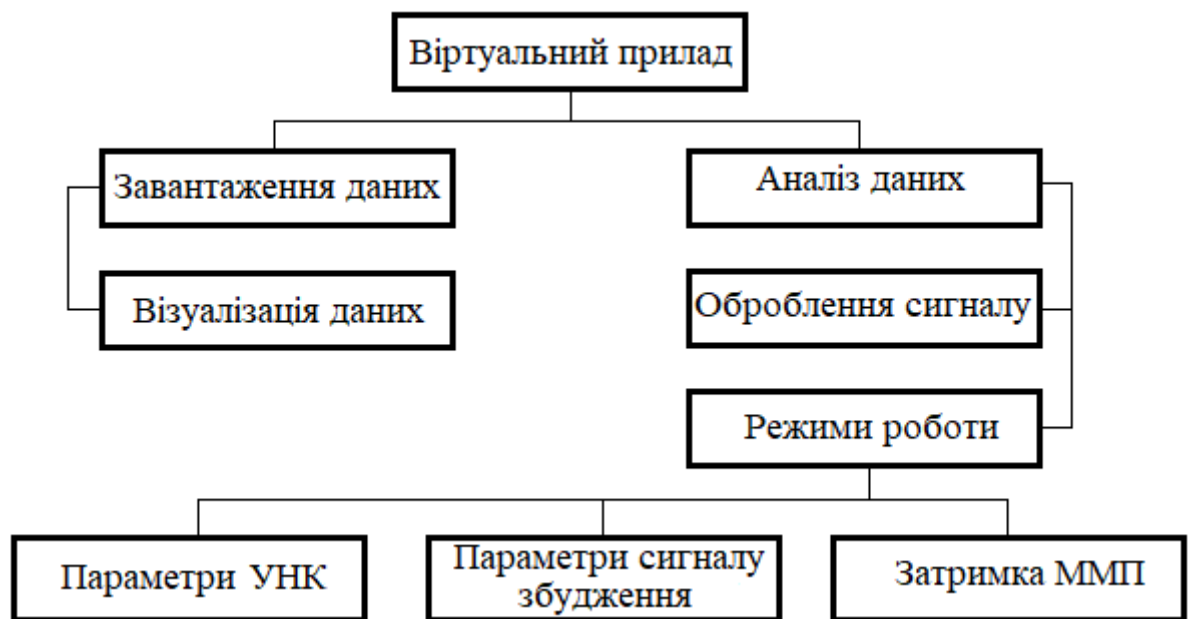


Рис. 3.2 – Структура віртуального пристрою

Аналіз програмної реалізації в контексті теоретичних положень, викладених у науковій частині попереднього розділу, демонструє комплексний підхід до математичного моделювання ультразвукового контролю об'єктів з дефектами. Програмний код реалізує чисельне розв'язання хвильового рівняння

для двовимірної області, що відповідає основним теоретичним принципам, описаним у розділі.

Математична основа моделі полягає у апроксимації хвильового рівняння методом скінченних різниць. Рівняння трансформовано у дискретну форму з використанням центральних різниць для просторових похідних та часового крокування. Область розв'язку розбита на рівномірну сітку 61×61 вузлів, що забезпечує достатню роздільну здатність для аналізу хвильових процесів. Швидкість поширення звуку в середовищі задана значенням 0,5, що відповідає параметрам досліджуваних матеріалів.

Важливим аспектом реалізації є моделювання точкового джерела гармонійних коливань, розташованого в центрі обчислювальної області. Джерело формує сигнал у вигляді синусоїди з частотою 18π , що генерує хвилі, які поширюються у всіх напрямках. Цей підхід відповідає експериментальній методиці ультразвукового контролю, де використовуються п'єзоелектричні перетворювачі для створення акустичних хвиль.

Граничні умови реалізовані з урахуванням фізики відбиття хвиль від меж обчислювальної області. Умови Неймана забезпечують мінімізацію небажаних відбиттів та імітують напівнескінченне середовище. Особливу увагу приділено коректній обробці кутових точок, де використано середнє арифметичне значень сусідніх вузлів.

Моделювання дефектів типу тріщини виконується шляхом модифікації коефіцієнтів різницевого рівняння у відповідних областях. Це дозволяє імітувати розсіювання хвиль на неоднорідностях матеріалу. Програмна реалізація передбачає можливість зміни положення та орієнтації дефектів, що відповідає завданню дослідження впливу геометричних параметрів тріщини на характеристики прохідного сигналу.

Для розв'язання отриманої системи лінійних рівнянь використовується спеціалізований розв'язувач, що забезпечує стійкість чисельної схеми при великих часах моделювання. У рамках оберненої задачі реалізовано два альтернативних підходи: евристичний алгоритм на основі популяційного

пошуку та генетичний алгоритм з бінарним кодуванням параметрів. Ці методи дозволяють оцінювати параметри джерела збудження за експериментально отриманими даними, що є ключовим для практичного застосування ультразвукового контролю.

Візуалізація результатів включає анімацію поширення хвиль у тривимірному просторі та побудову часових реалізацій сигналів у контрольних точках. Це дозволяє проводити якісний аналіз впливу дефектів на характеристики акустичних хвиль, зокрема зменшення амплітуди та зміни частотного спектру.

Програмна реалізація демонструє повну відповідність теоретичним положенням, викладеним у розділі 2, та забезпечує ефективний інструмент для дослідження впливу геометричних параметрів дефектів на результати ультразвукового контролю. Отримані результати підтверджують теоретичні висновки про значне вплив навіть невеликих дефектів на амплітудно-частотні характеристики прохідного сигналу.

Логічну основу програми складає система коефіцієнтів для різницевих рівнянь, які формуються у відповідності до фізичних властивостей середовища. Коефіцієнти ax , ay , sx , sy відповідають просторовим похідним у рівнянні, тоді як матриці b та d визначають основну діагональ та праву частину системи рівнянь.

Важливим структурним елементом є блок моделювання джерела збудження, який реалізується через умовний оператор, що контролює тривалість та інтенсивність зовнішнього впливу. Джерело представлене у вигляді точкового об'єкта з координатами (ind, jnd) , що генерує гармонійні коливання з частотою k . Умова $k\pi t \leq 4\pi$ забезпечує обмеження часу дії джерела, імітуючи реальний імпульсний режим роботи ультразвукового перетворювача.

Система управління обчислювальним процесом включає механізм оновлення часових шарів, де відбувається циклічне присвоєння $U_{00}=U_0$ та $U_0=U$. Це забезпечує коректне обчислення другої похідної за часом та підтримку

історії розвитку хвильового процесу. Масив *sol* виконує функцію зберігання часових зрізів розв'язку для подальшої візуалізації та аналізу.

Модуль збору даних реалізований через систему контрольних точок, позиції яких задаються масивом *Pos*. Для кожної точки формується часовий сигнал, що зберігається у масиві *Signal*. Цей механізм дозволяє відтворювати експериментальні умови вимірювань та проводити порівняльний аналіз сигналів у різних точках спостереження.

В алгоритмі оберненої задачі ключовим структурним елементом є популяційний підхід, де кожна особина представляє можливу комбінацію параметрів джерела. Генетичний алгоритм використовує операції кросоверу та мутації для дослідження простору параметрів. Бінарне кодування забезпечує уніфікацію представлення параметрів різної природи, а функція пристосованості оцінює якість розв'язку через модуль прямого моделювання.

Логіка візуалізації включає двоетапний процес: інтерактивну анімацію поширення хвиль у реальному часі та побудову графіків сигналів у вибраних точках. Анімація реалізована через циклічне оновлення поверхневого графіка з контролем часових інтервалів, що дозволяє спостерігати динаміку хвильового процесу.

Структура даних програми організована на основі тривимірних масивів, де перші два індекси відповідають просторовим координатам, а третій – часовому кроку. Така організація забезпечує ефективний доступ до даних та спрощує реалізацію алгоритмів обробки. Система управління пам'яттю оптимізована через використання попередньої ініціалізації масивів фіксованого розміру.

Архітектура програми демонструє модульний підхід, де кожен функціональний блок виконує чітко визначену задачу. Взаємодія між модулями забезпечується через стандартизовані інтерфейси та уніфіковані формати даних, що підвищує надійність та зручність супроводу програмного коду.

Ключові особливості реалізації

– *Граничні умови.* Змішані граничні умови, що враховують відбиття хвиль.

- *Джерело збудження.* Синусоїдальний сигнал $\sin(k \cdot \pi \cdot t)/30$ у центральній точці.
- *Область дефекту.* Моделюється через модифікацію коефіцієнтів у рівнянні.
- *Часова дискретизація.* Метод скінченних різниць з кроком $\Delta t = 0.01$

Методика дослідження

1. *Пряме моделювання.* Розрахунок поширення хвиль через область з дефектами
2. *Збір даних.* Реєстрація сигналів у контрольних точках
3. *Обернена задача.* Визначення параметрів дефектів за вимірними сигналами

Візуалізація та аналіз. Програма забезпечує анімацію поширення хвиль у 3D-просторі, побудову графіків сигналів у контрольних точках та порівняльний аналіз сигналів для різних конфігурацій дефектів.

Ініціалізаційна частина коду відповідає за задання базових параметрів моделювання. Змінні px та py визначають розмірність обчислювальної сітки, а Lx і Ly – фізичні розміри області дослідження. Кроки сітки hx і hy розраховуються автоматично, що забезпечує універсальність коду при зміні роздільності. Масиви x і y формують координатну сітку, на якій відбувається обчислення розв'язку.

Блок ініціалізації полів створює матриці коефіцієнтів ax , ay , sx , sy , b , d , які визначають структуру різницевого рівнянь. Масиви $U00$ і $U0$ зберігають значення поля на попередніх двох часових шарах, що необхідно для реалізації схеми другого порядку точності за часом.

Параметри часової дискретизації включають крок інтегрування dt , поточний час t та кінцевий час моделювання T_{fin} . Змінна c задає швидкість поширення хвилі, а параметр k визначає частоту збудження. Масив sol призначений для зберігання повної часової історії розв'язку.

Основний обчислювальний цикл реалізує ітераційний процес розв'язання хвильового рівняння. На кожному кроці відбувається формування коефіцієнтів

різницевих рівнянь для внутрішніх точок області. Вираз для $d(i, j)$ включає дискретні аналоги другої похідної за часом та просторових похідних, що відповідає апроксимації хвильового рівняння.

Блок моделювання джерела модифікує коефіцієнти в точці з координатами (ind, jnd) , що імітує точкове джерело гармонійних коливань.

Корекція граничних умов виконується шляхом модифікації коефіцієнтів біля меж обчислювальної області. Це забезпечує виконання умов відбиття хвиль на границях. Подальше оновлення значень на границях реалізує умови непроникнення.

Виклик розв'язувача є ключовим елементом, що виконує розв'язання системи лінійних рівнянь. Ця функція реалізує чисельний метод знаходження поля на новому часовому шарі.

Блок збору даних формує масив *Signal*, який містить часові реалізації сигналів у контрольних точках, заданих масивом *Pos*. Для кожного моменту часу запам'ятовуються значення поля в заданих точках спостереження.

Візуалізаційна частина включає створення анімованого графіка поширення хвилі за допомогою функції *surf*, а також побудову окремих графіків сигналів у контрольних точках. Налаштування зовнішнього вигляду графіків здійснюється через параметри *FontSize*, *FontName* та *fontweight*.

Модуль оберненої задачі реалізує генетичний алгоритм пошуку оптимальних параметрів. Кодування параметрів у бінарному вигляді дозволяє уніфікувати операції кросоверу та мутації. Функція пристосованості оцінюється через виклик *DirectMain* з поточними значеннями параметрів.

Операції генетичного алгоритму включають селекцію, кросовер та мутацію. Кросовер реалізований через обмін частинами бінарних рядків, а мутація – через інверсію випадкових бітів. Сортування популяції за значенням функції пристосованості забезпечує елітарний відбір.

Код демонструє логічну цілісність та відповідність математичній моделі, описаній у попередньому розділі, забезпечуючи повний цикл дослідження – від прямого моделювання до розв'язання оберненої задачі.

3.3. Розроблення інтерфейсу користувача для УЗНК з ММП

Інтерфейс користувача і власне віртуальний прилад, який виконує функції управління режимами роботи системи, цифрового опрацювання сигналів, візуалізації даних та їх збереження реалізовані в середовищі Labview [78]. LabVIEW уявляє мову графічного програмування, в якій використовуються графічні образи (іконки) замість традиційного текстового коду.

На фронтальній панелі (ФП) віртуального пристрою розміщені віджети-індикатори для відображення вимірюваної інформації та результатів розрахунків. Вимірні сигнали (випромінені й прийняті) відображаються на єдиному графіку (поз. 1 на рис. 3.3). На графіку відображаються як вимірні сигнали, так і їх відфільтровані варіанти. На лівій вертикальній осі графіка відображається значення напруги сигналу збудження. Права вісь – це значення напруги прийнятого сигналу.

Крім того індикатори відображають результати як проміжних розрахунків (поз. 2 на рис. 3.3), так і результати розрахунку цільових параметрів (поз. 3 на рис.3.3).

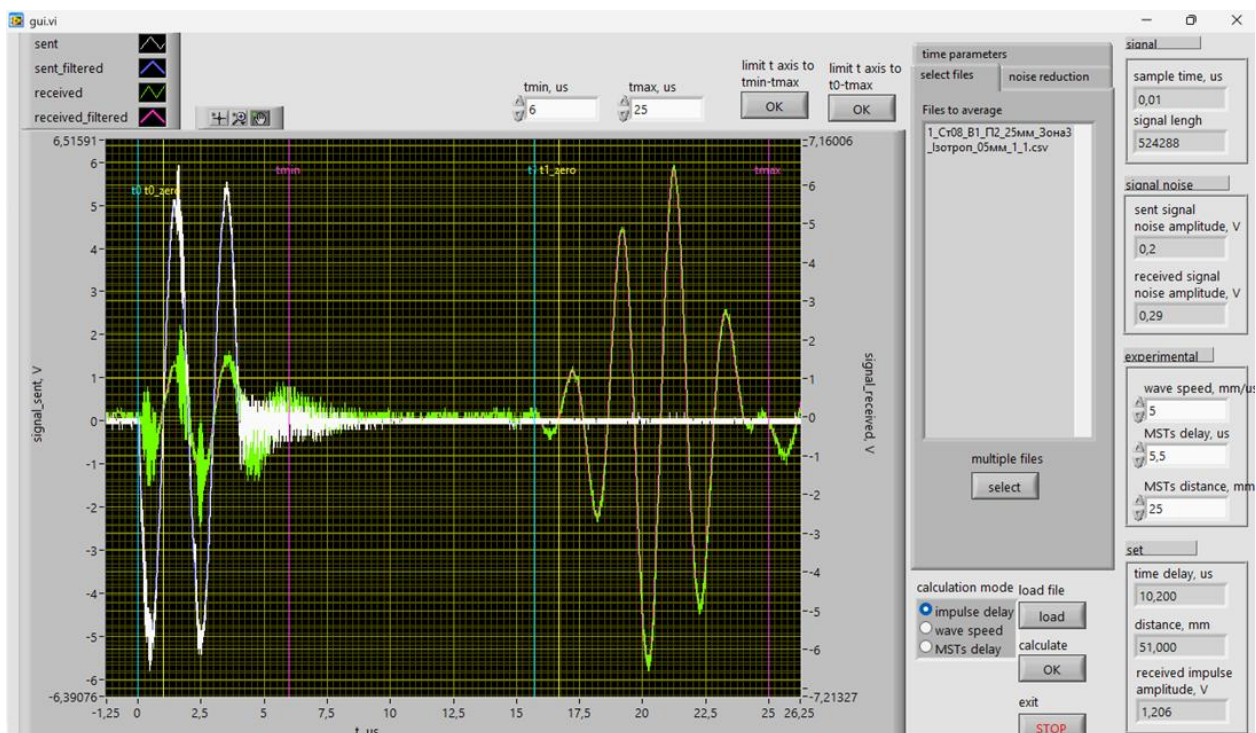


Рис. 3.3 – Фронтальна панель віртуального приладу

На ФП також розташовані віджети управління для установки вхідних даних, які потрібні для розрахунків. До таких віджетів належать:

- віджет, що встановлює шлях до файлу даних;
- віджет вибору режиму аналізу сигналу;
- віджети, що задають параметри розрахунку при завантаженні файлу; ці віджети задають параметри, пов'язані з обробленням сигналу;
- віджети основних фізичних даних;
- віджети, що задають розмір вікна розрахунку.

Управління роботою ВП здійснюється за допомогою керуючих віджетів – кнопок. Режим роботи вибирається наступними кнопками:

- кнопка для завантаження даних, відображення та розрахунку параметрів ;
- кнопка розрахунку даних після внесення змін до віджетів керування для налаштування вхідних даних;
- кнопки зміни вікна відображення сигналу.

Блок-схема ВП (рис.3.4). Архітектура потоку даних реалізована за зразком «виробник/споживач». ВП виконує дії в результаті подій, які створюються керуючими віджетами.

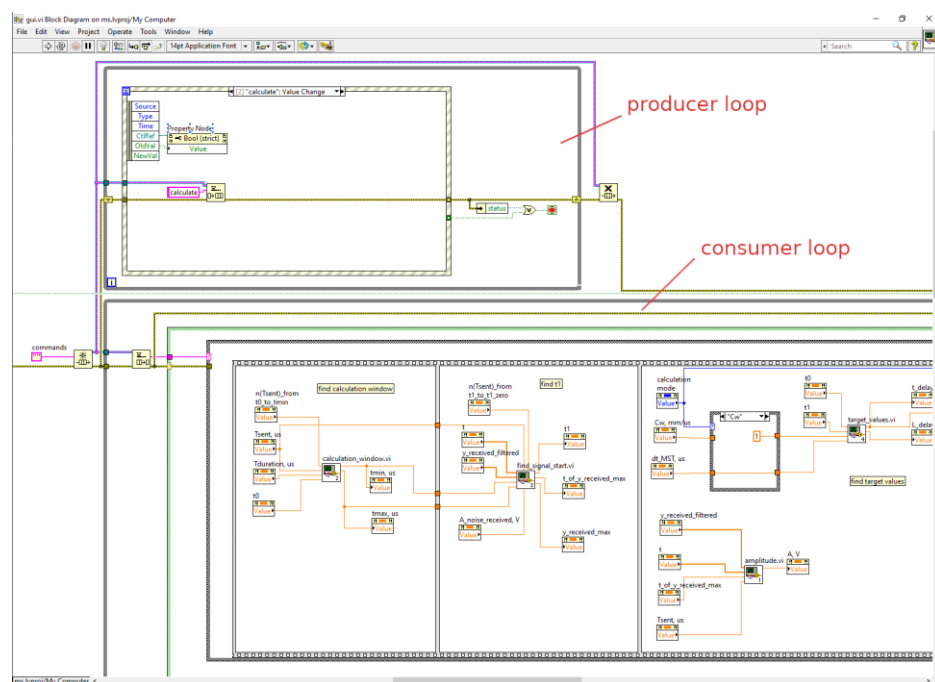


Рис. 3.4 – Блок-схема ВП

Модель «виробник/споживач» організована за допомогою двох взаємопов'язаних циклів: циклу виробника і циклу споживача. Цикл виробника містить структуру подій, яка відстежує всі події, що відбуваються у ВП. Цей цикл виконується тільки в разі настання будь-якої події, яка вказана в структурі події. Ці два цикли пов'язані структурою даних «черга». Цикл *producer* відправляє в "чергу" ім'я функції, яку потрібно виконати, відповідно до події в структурі події. Якщо в черзі є дані, то вони відразу ж обробляються споживчим циклом.

Вимірювання характеристик радіоімпульсного сигналу на виході ММП-приймача супроводжується впливом шумової компоненти сигналу. В процесі отримання радіоімпульсного сигналу можуть виникати ефекти перешкод, які значно спотворюють сигнал (див. рис. 3.5). Такі перешкоди збільшують похибку визначення часового положення відносно зондуємого сигналу.

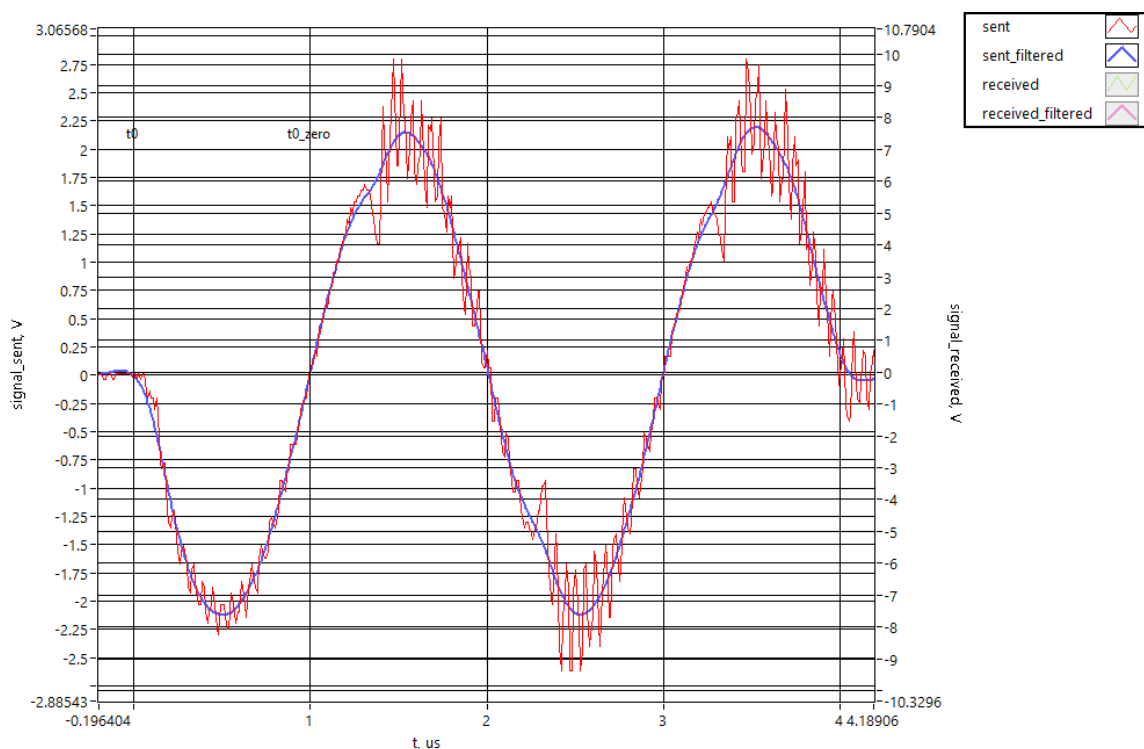


Рис. 3.5 – Приклад адитивної суміші радіоімпульсу та шуму

Зменшення коефіцієнта електроакустичного тракту системи, яке відбувається при збільшенні зони контролю та прагненні виявити дефекти менших розмірів, приводить до зменшення відношення сигнал/шум у прийнятій

суміші. Її підсилення автоматично приводить і до підсилення шумової компоненти. Наявність значних шумів спотворює форму сигналу і унеможливорює точне визначення затримки прийнятого сигналу в акустичному тракті системи.

У ВП для збільшення відношення сигнал/шум реалізовано алгоритм частотної фільтрації. З цією метою у ВП реалізовано цифровий фільтр Баттерворта з нескінченною імпульсною характеристикою (НІХ-фільтри, англійською IIR-filter) для фільтрації високих частот сигналу. Реалізація рекурсивного НІХ-фільтра передбачає, що поточне значення відфільтрованого сигналу залежить від поточного і попередніх значень вхідного сигналу. Фільтр має два набори коефіцієнтів: прямий і обернений. Істотним недоліком НІХ-фільтрів є нелінійність їх фазово-частотної характеристики [79].

Передавальна функція фільтра представлена дискретним z -перетворенням в загальній формі визначається як

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{N_b-1} z^{-(N_b-1)}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{N_a-1} z^{-(N_a-1)}}. \quad (3.1)$$

Різницеве рівняння, що реалізує НІХ-фільтр на основі передавальної функції (5.1) в прямому вигляді дається виразом

$$y_i = \sum_{j=0}^{N_b-1} b_j x_{i-j} - \sum_{k=1}^{N_a-1} a_k y_{i-k}, \quad (3.2)$$

де b_j , ($j = 0, 1, 2, \dots, N_b - 1$) – прямі коефіцієнти для вхідних значень x_{i-j} ; a_k , ($k = 1, 2, \dots, N_a - 1$) – обернені коефіцієнти для попередніх відфільтрованих значень y_{i-k} [80]. Певним недоліком прямої форми реалізації фільтра (3.2) є чутливість до помилок розрахунків і нестабільність результату при збільшенні числа коефіцієнтів. Для позбавлення від цих недоліків використовується каскадна форма представлення фільтрів, шляхом розбиття фільтрів високого порядку на кілька послідовних фільтрів не вище другого порядку [81]. У LabVIEW каскадний вигляд фільтрів дозволяє вибирати між другим і четвертим порядком. В результаті такого перетворення рівняння передавальної функції (5.1) перетворюється в добуток ланок другого або четвертого порядків

$$H(z) = \prod_{k=1}^{N_s} \frac{b_{0k} + b_{1k}z^{-1} + b_{2k}z^{-2}}{1 + a_{1k}z^{-1} + a_{2k}z^{-2}}, \quad (3.3)$$

де N_s – кількість фільтрів 2-го порядку, яка визначається як найбільше ціле число, яке менше або дорівнює $N_a/2$, $N_a \geq N_b$.

У програмі реалізовано фільтр 2-го порядку з функцією передачі

$$H(z) = \frac{0.0055 + 0.0111z^{-1} + 0.0055z^{-2}}{1 - 1.7786z^{-1} + 0.8008z^{-2}}. \quad (3.4)$$

Недоліком таких фільтрів є спотворення фази початкового сигналу, що збільшує похибку визначення моменту початку сигналу. Щоб позбутися цього недоліку, потрібно використовувати фільтр зі зсувом фаз нуля

$$Y(z) = H(-z)H(z)X(z) = |H(z)|^2 X(z). \quad (3.5)$$

Даний фільтр реалізований на основі звичайного фільтра низьких частот (3.4) за рахунок передачі сигналу через фільтр в прямому напрямку, після чого прийнятий відфільтрований сигнал, в зворотній послідовності, знову пропускається через той самий фільтр [82,83].

Рівняння (3.5) являє собою частотне представлення процесу фільтрації з нульовим фазовим зсувом. У (3.5) $X(z)$ – z -перетворення вхідного сигналу, а $Y(z)$ – z -перетворення вихідного відфільтрованого сигналу. Фільтр нульового фазного зсуву реалізований на основі каскадного НІХ-фільтра [84].

Коефіцієнти передавальної функції фільтра (5.4) залежать від заданої частоти зрізу. У програмі вказується не сама частота зрізу, а значення коефіцієнта, яке вказує, у скільки разів ця частота менша за частоту Найквіста. Результати використання розробленого фільтра для знешумлення сигналів показані на рис. 3.5.

Відсутність значних перешкод у фільтрованому сигналі супроводжується згладжуванням початку сигналу, що в свою чергу призводить до збільшення похибки у визначенні часу затримки. Зменшення цієї похибки досягається обчисленням початку сигналу щодо деякої опорної точки сигналу, яка не спотворюється його фільтрацією. В якості такої точки обрана точка першого перетину сигналом нульового значення (див. рис. 3.5).

Отримані ММП-приймачем сигнали перед фільтрацією центрують і визначають середньоквадратичне значення (СКЗ) шуму. Це значення використовується як межа чутливості для визначення піків і западин сигналу (див. рис. 3.6) [85].

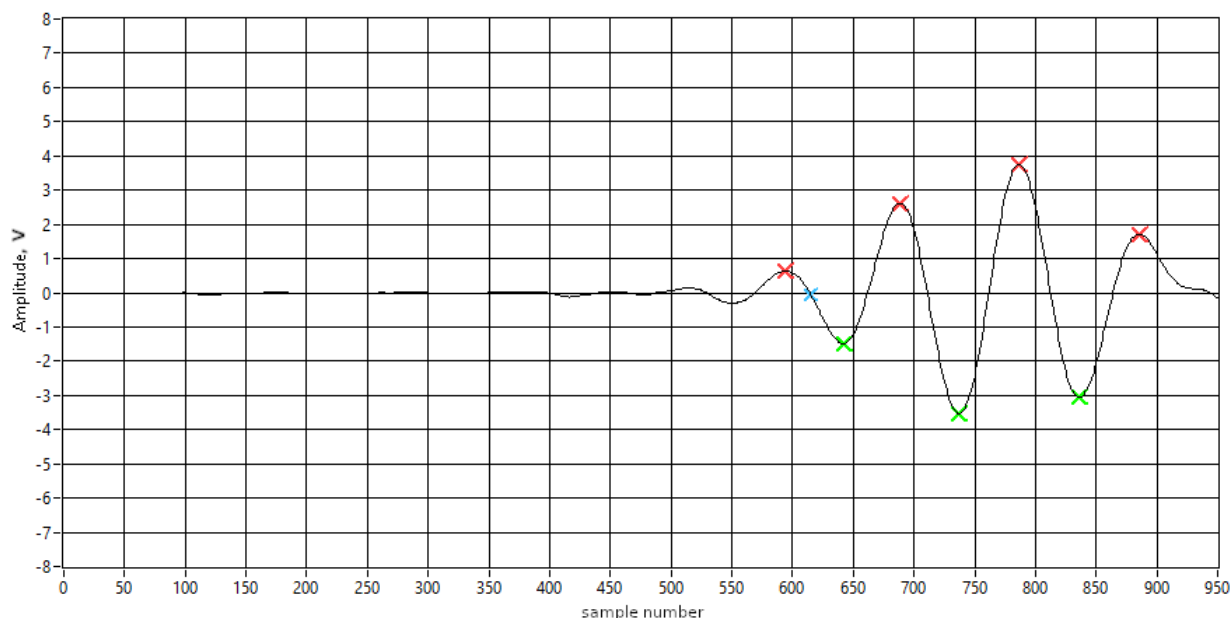


Рис. 3.6 – Визначення піків (червоний колір) та западин (зелений) сигналу і перетин сигналом нульового рівня (синій)

У LabVIEW реалізований ВП для виявлення піків і западин в масиві значень аналізованого сигналу [86]. З масиву визначених піків і западин вибирається один для виділення інтервалу першого перетину сигналу з нульовим рівнем (рис. 3.7).

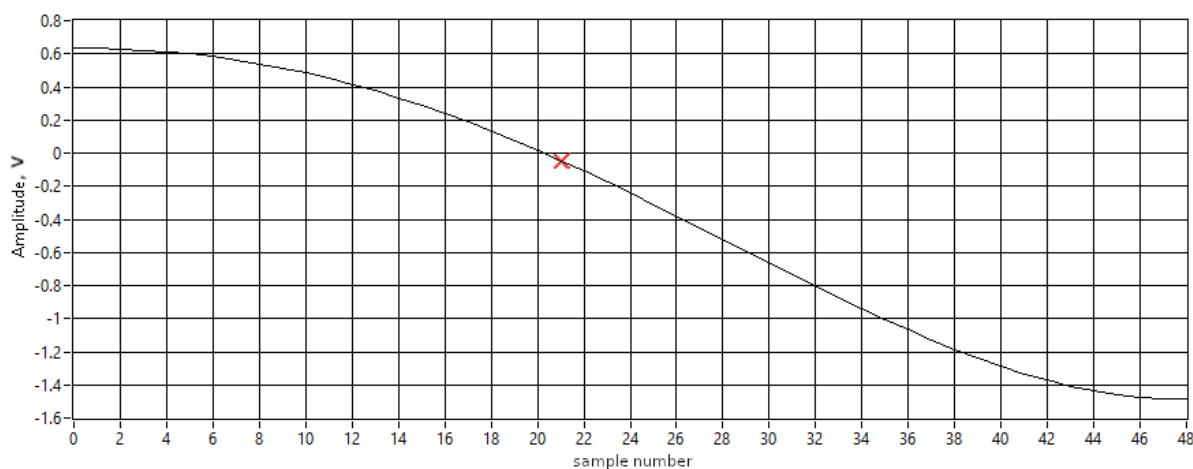


Рис.3.7 – Визначення моменту першого перетину сигналу з нульовим рівнем

Визначена точка перетину служить точкою відліку, відносно якої розраховується початок сигналу. Оскільки період сигналу-носія не змінюється в результаті його проходження через матеріал зразка, то алгоритмом визначення тривалості часового інтервалу передбачено віднімання від моменту часу, що відповідає контрольній точці, півперіоду сигналу-носія для визначення моменту початку часового інтервалу рівного затримці акустичного сигналу в ОК.

Розроблений ВП пройшов тестування на задачі визначення швидкості поширення поверхневих, поздовжніх і хвиль Лемба в різних металевих зразках. Результати показали, що похибка у вимірювань часових інтервалів не перевищувала 1...2 %. Для підвищення точності вимірювань необхідно застосовувати фазові методи вимірювання.

3.4. Обґрунтування вимог та реалізація конструкції ММП випромінювача та приймача

При створенні ММП було необхідно вирішити низку задач [95]:

- підібрати магнітострикційний матеріал для хвилеводу;
- забезпечити малу апертуру перетворювача;
- вжити заходів до підвищення коефіцієнту електромагнітного перетворення;
- забезпечити лінеаризацію магнітострикції;
- мінімізувати шуми ММП-приймача;
- електрично узгодити перетворювачі з електронними блоками.

Компромісним варіантом між забезпеченням найкращих магнітострикційних характеристик та можливостями практичної реалізації ММП є використання в якості матеріалу осердя сплаву пермендіур 49КФ, який має один з найбільших серед інших матеріалів коефіцієнт магнітомеханічного зв'язку. Інші важливі характеристики цього матеріалу мають такі значення: щільність $\rho_n = +8200 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; модуль Юнга $E = 2,05 \cdot 10^{11} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$; швидкість поздовжньої хвилі $c_l = 5200 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; відносна магнітна проникність $\mu^* = 200$;

коерцитивна сила – $H_c = 140 \frac{A}{m}$; індукція насичення – $B_s = 2,4T$; температура Кюри – $\theta = 980^\circ C$; питомий електричний опір – $\rho_{ел} = 3,4 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; раціональне поле підмагнічування – $H_n = (0,4 \dots 0,6) \cdot 10^3 \frac{A}{m}$.

У виконаній розробці використано пружні коливання частотою 0,5 МГц для якої довжина хвилі у пермендурі становить $\lambda_n = \frac{c_l}{f} = \frac{5200}{500000} = 10,4 \text{ мм}$.

Під апертурою ММП будемо розуміти діаметр його хвилеводу. Саме цей параметр визначає площу плоскої ділянки на поверхні ОК, що контактує з хвилеводом ММП, через яку передається/приймається енергія пружної хвилі. Діаметр осердя обраний рівним $d = 1 \text{ мм}$, що задовольняє умову $d_c \ll \lambda_n$, а відповідна площа контактної площадки – $0,785 \text{ мм}^2$. Власне це і дає підстави називати такі перетворювачі малоапертурними.

Підвищення коефіцієнту електромагнітного перетворення здійснюється за рахунок використання двосекційної котушки збудження з рознесенням секцій на відстань $\frac{\lambda_n}{2}$ (рис. 3.8) і включеними назустріч. В цьому випадку при живленні котушки ММП-передавача радіоімпульсним сигналом амплітуда сумарного струмового сигналу в середній частині подвоюється, що веде до збільшення у ~ 2 рази змінної складової магнітного поля у хвилеводі без збільшення амплітуди струму збудження. Побічним негативним наслідком такого прийому є збільшення тривалості радіоімпульсу.

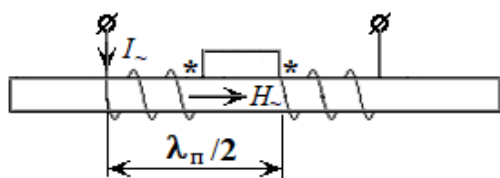


Рис. 3.8 – Електричне підключення та розташування котушок на хвилеводі

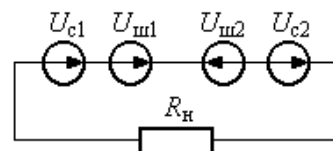


Рис. 3.9 – Електрична схема формування е.р.с. в котушках ММП-приймача

Лінеаризація магнітострикції забезпечується за допомогою підмагнічування хвилеводу постійним магнітом (на рисунку не показаний).

Оскільки електрична котушка на феромагнітному осерді уявляє собою антену, то котушка ММП-приймача також виконана двосекційною (рис. 3.9), що забезпечує зменшення впливу зовнішніх завад та шумів. Ефект заглушення шуму пояснює еквівалентна електрична схема (рис. 3.9), яка містить послідовно ввімкнені електро рушійна сила (е.р.с.) сигналу U_{c1} , U_{c2} та шуму $U_{ш1}$, $U_{ш2}$, які виникають в секціях котушки ММП-приймача, і які навантажені на опір R_n . Схема складена з урахуванням включення назустріч секцій котушки і їх рознесенням у просторі на величину $\frac{\lambda_n}{2}$. Двосекційне виконання котушки ММП-приймача забезпечує не тільки додаткове збільшення корисного сигналу за рахунок синфазного включення е.р.с. U_{c1} , U_{c2} , але й значне заглушення шуму за рахунок протифазного включення е.р.с. $U_{ш1}$, $U_{ш2}$.

Експериментально доведено, що використання багат шарових котушок ММП малоефективне. Тому котушки ММП виконані одношаровими і містять всього декілька десятків витків, а їх електричний імпеданс може становити величину 1...20 Ом. Узгодження низькоомного імпедансу ММП з високоомним імпедансом електронного блоків (зазвичай становить 50...8000 Ом) здійснюється за допомогою трансформаторів, які розташовуються у перетворювачі поблизу котушок ММП.

Конструкція ММП в цілому подібна до наведеної в [48,49].

Конструкція ММП зображена на рис. 3.10, на якому позначено: 1 – корпус, 2 – ультразвукове дзеркало, 3 – хвилевід, 4 – постійний магніт, 5 – електричні котушки, 6 – трансформатор, 7 – поглинаюче навантаження, 8 – кришка, 9 – роз'єм. Розміри хвилеводу: діаметр 1 мм, довжина 60 мм. В конструкції ММП поглинаюче навантаження 7 введене з метою виключення перевідбиття ультразвукових коливань від неробочого кінця хвилевода.

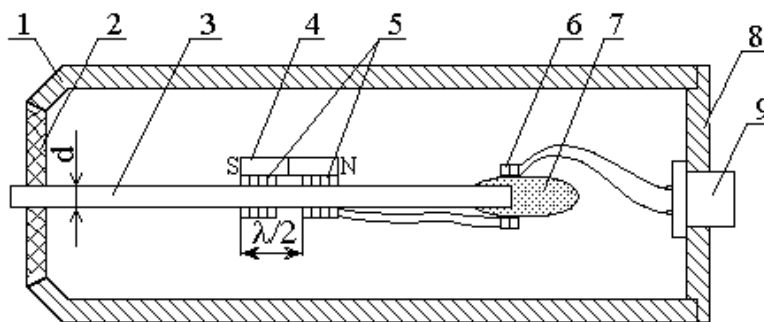


Рис. 3.10 – Конструкція ММП

Результати вимірювання параметрів котушки ММП наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Параметри котушки ММП

Об'єкт вимірювання	Індуктивність, мкГн	Опір, Ом
Одна секція котушки ММП	12,3	0,38
Двосекційна котушка ММП	8,2	0,72

Вимірювання виконувалось вимірювачем RLC імпедансу UNI-T UT-612.

Згідно даних табл.1 модуль комплексного опору котушки ММП не перевищує 4,2 Ом, тобто уявляє собою низькоомне навантаження. Узгодження перетворювача з електронними блоками системи виконано за допомогою трансформаторів.

Малі значення імпедансу ММП обумовлюють необхідність спеціальних заходів для його узгодження з електронними блоками розроблювальної системи контролю. З цією метою використано трансформатори, які конструктивно розміщені в корпусі ММП.

Малі розміри контактної площадки, через яку вводяться ультразвукові коливання в ОК, визначаються діаметром хвилеводу, що дає змогу виконувати дослідження на ОК зі складною геометрією поверхні.

Технологія виготовлення малоапертурних магнітострикційних перетворювачів складається з таких етапів:

1. Підготовка магнітострикційного стрижня (відпал).

Відпал проводиться електричним струмом, що пропускається крізь магнітострикційний стрижень до помітного почервоніння стрижня протягом трьох хвилин. Після цього струм повільно зменшується до 0 А.

2. Виготовлення корпусу перетворювача.

Корпус перетворювача виготовляється з мідної трубки потрібного діаметру шляхом відрізання за допомогою труборіза необхідної довжини.

3. Виготовлення ультразвукового демпфера на кінці магнітострикційного стрижня.

Демпфер виготовляється з епоксидної смоли ЕД-20, що наповнена порошком вольфраму 1:1 по вазі, шляхом заливання у спеціально виготовлену форму.

4. Намотування котушки збудження.

Котушка збудження складається з двох послідовно з'єднаних напівобмоток, що намотуються в різних напрямках і розташовані в стрижні одна від одної на відстані половини довжини ультразвукової хвилі.

5. Закріплення на стрижні з котушкою постійного магніту.

Ніодимовий магніт циліндричної форми розташовується симетрично кінцям обмотки і фіксується на стрижні за допомогою клею БФ-6. Загальний вид чутливого елемента наведено на рис. 3.11.

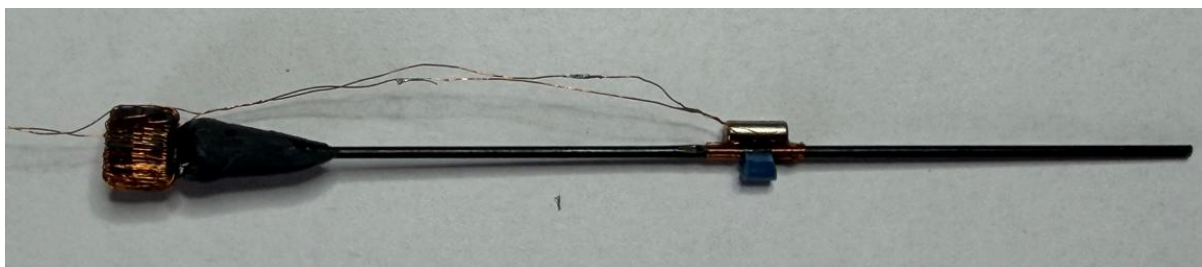
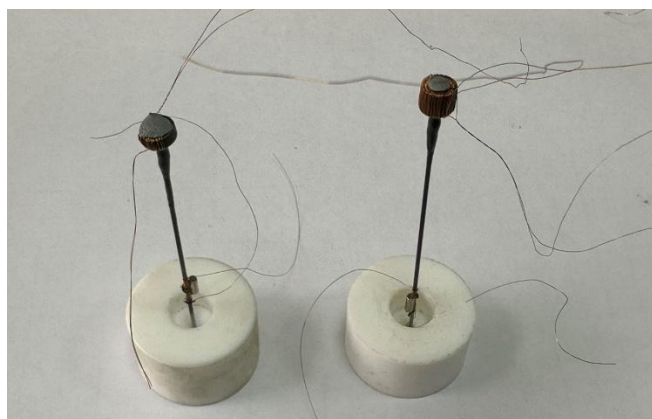


Рис. 3.11 – Фото хвилеводу з двосекційною котушкою, постійним магнітом та поглинаючим навантаженням

6. Виготовлення узгоджуючого трансформатора, закріплення його на стрижні та електричне з'єднання виводів первинної обмотки з виводами котушки збудження.

Узгоджуючий трансформатор намотується на феритовому осерді, закріплюється на демпфері за допомогою клею БФ-6. Виводи первинної обмотки трансформатора паяються до виводів котушки збудження. Місця пайки ізолюють.

Загальний вид хвилеводу в зборі, встановленого в оснастку для закріплення в корпусі перетворювача, наведено на рис. 3.12, а.



а



б

Рис. 3.12 – Ілюстрація процесу виготовлення ММП: а – фторопластова оснастка з встановленим хвилевод в зборі, б – хвилевод у корпусі перед закріпленням магнітострикційного стрижня

7. Закріплення в корпусі стрижня з котушкою, магнітом та узгоджуючим трансформатором.

Магнітострикційний стрижень з котушкою, демпфером, магнітом та узгоджуючим трансформатором за допомогою спеціальної оснастки та епоксидної смоли з наповнювачем закріплюється в корпусі. Виводи вторинної обмотки виходять зовні з іншої сторони корпусу (рис. 5.10, б).

8. Електричне з'єднання виводів вторинної обмотки узгоджуючого трансформатора з роз'ємом перетворювача.

Електричне з'єднання виводів вторинної обмотки узгоджуючого трансформатора з роз'ємом перетворювача виконується шляхом паяння.

9. Кріплення електричного роз'єму на корпусі перетворювача.

Електричний роз'єм спочатку закріплюється на мідній шайбі, а потім шайба кріпиться до корпусу за допомогою пайки сплавом Розе.

Загальний вид ММП наведено на рис. 3.13.



Рис. 3.13 – Фото ММП

Технології виготовлення ММП-випромінювача та ММП-приймача ідентичні, а їх конструкції відрізняються лише параметрами узгоджувачих трансформаторів.

3.5 Висновки до розділу 3

У розділі наведено структуру апаратних засобів системи ультразвукового магнітострикційного неруйнівного контролю з ММП, яка забезпечує генерування електричних сигналів для збудження ММП-випромінювача, підсилення сигналів ММП-приймача та їх аналого-цифрового перетворювача.

Реалізація значної частини функцій обчислювальних алгоритмів, аналізу та візуалізації експериментальних даних здійснена у вигляді віртуального приладу, розробленого в графічному програмному середовищі LabVIEW. Використання такої ідеології побудови системи УЗНК дає змогу модернізувати систему за рахунок модифікації алгоритмів опрацювання вимірювальної інформації та доповнення системи новими функціональними можливостями без зміни її апаратної частини.

Важливою складовою віртуального приладу є інтерфейс користувача, який виконує функції управління режимами роботи системи в інтерактивному режимі, завдання цифрового опрацювання сигналів, візуалізації даних та їх збереження.

Сформульовано вимоги до ММП, що дало змогу обґрунтувати вибір матеріалу хвилеводу, в якості якого використано пермендюр 49КФ – сплав заліза і кобальта з додаванням ванадію, та застосування двосекційної котушки в ММП-випромінювачі та ММП-приймачі. Використання двосекційної котушки дає

змогу підвищити ефективність перетворення в ММП електричних сигналів в акустичні і навпаки за рахунок збільшення амплітуди інформаційного сигналу, які дадаються у формі радіоімпульсів.

У розділі також наведено результати розроблення технології виготовлення ММП, яка включає етапи виготовлення корпусу ММП, підготовки магнітострикційного хвилеводу та його оснащення демпфером, намотування котушки збудження та закріплення на них постійного магніту, виготовлення узгоджуючого трансформатору та його закріплення на хвилеводі, а також розміщення сенсору – хвилеводу з двосекційною котушкою, постійним магнітом та поглинаючим навантаженням, в корпусі ММП та електричне підключення обмоток котушки до роз'ємам ММП. Запропонована технологія виготовлення ММП забезпечує ефективне перетворення енергії електричного сигналу в енергію пружних коливань, необхідних для діагностики ОК.

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ МАГНІТОСТРИКЦІЙНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

4.1 Алгоритм проведення експериментальних досліджень ультразвукового контролю з використанням ММП.

Для проведення експериментальних досліджень з використанням неруйнівного ультразвукового контролю з використанням ММП була розроблено алгоритм проведення експериментів, який спрямовано на визначення цілісності та структурної однорідності в тонкостінних зразках зі сталі та зварних з'єднань і ґрунтується на аналізі параметрів поширення сигналу в об'єкті дослідження.

Перед проведенням досліджень визначаються геометричні параметри, проводиться візуальний контроль поверхонь для зварних з'єднань фіксується наявність або відсутність механічної обробки шва.

Проводиться налаштування вимірювальної системи та параметрів зондування, визначається відстань між випромінювачем та приймачем, яку забезпечує використання спеціального тримача.

Встановлюється частота заповнення радіоімпульсу 0,5 МГц та частота повторення 20 Гц.

Розроблений алгоритм ультразвукового контролю з використанням ММП складається з двох етапів: етап підготовки та етап контролю. Етап підготовки та етап контролю алгоритму наведені на рис 4.1

Етап підготовки включає в себе визначення часу затримки в перетворювачах, дослідження ізотропного фрагменту, визначення максимального значення амплітуди, часу проходження сигналу в зразках.

Середнє значення амплітуди визначають за формулою (4.1):

$$\tilde{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \quad (4.1)$$

Середньоквадратичне відхилення (СКВ) амплітуди визначають за формулою (4.2):

$$\tilde{\sigma}_{\square} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (A_i - \tilde{A}_{\square})^2} \quad (4.2)$$

Значення максимальної амплітуди знаходять за співвідношенням (4.3):

$$A_{max} = \tilde{A}_{\square} + g_{max} \cdot \tilde{\sigma}_{\square} \quad (4.3)$$

Де $g_{max}=2$ при нормальному або невідомому законі розподілу та довірчій імовірності $P = 0,95$.

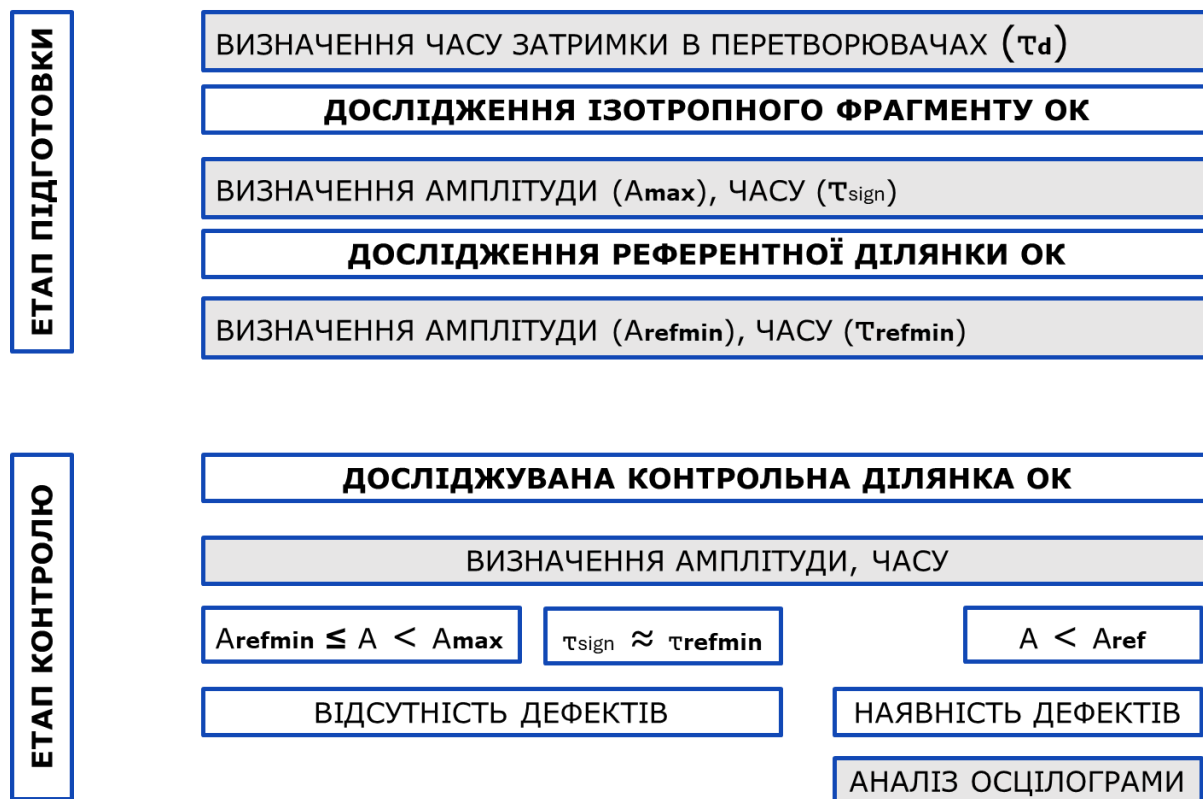


Рисунок 4.1 Алгоритм ультразвукового контролю з використанням ММП

Етап підготовки включає в себе дослідження референтної ділянки в ході якого визначається амплітуда та мінімальний час проходження сигналу.

Середня амплітуда референсної ділянки $\tilde{A}_{ref}$ та середньоквадратичне відхилення $\tilde{\sigma}_{ref}$ визначаються за формулами 4.1 та 4.2.

Мінімальне значення референсної амплітуди визначається за формулою 4.4

$$A_{refmin} = \tilde{A}_{ref} - g_{max} \cdot \tilde{\sigma}_{ref} \quad (4.4)$$

На етапі контролю, при проведенні експериментів з на досліджуваній ділянці зварного з'єднання визначається амплітуда, час проходження сигналу.

Проводиться перевірка умов, якщо амплітуда попадає між показниками значень мінімальної амплітуди на референтній ділянці та значенням максимальної амплітуди на ізотропному фрагменті та якщо час проходження сигналу в зразку приблизно дорівнює часу проходження сигналу на референтній ділянці дефекти в об'єкті контролю відсутні. Якщо амплітуда сигналу в об'єкті контролю менша за амплітуду референтної ділянки в ОК, то в досліджуваній точці об'єкту контролю додатково проводиться аналіз осцилограми.

Обов'язковою умовою аналізу осцилограм є накладання результатів мінімум двох результатів дослідження в зоні контролю та референтної ділянки.

Для оцінювання невизначеності вимірювань амплітудних характеристик сигналів ММП при ультразвуковому контролі визначено наступні складові.

Стандартна відносна невизначеність за типом В для осцилографа, як засобу вимірювання сигналу отримані від перетворювачів ММП:

$$u_B(osc) = \frac{\Delta_{osc}}{k_{osc}} \cdot 100\% \quad (4.5)$$

де Δ_{osc} – розширена невизначеність відповідного приладу, зазначена в свідоцтві про калібрування;

k_{osc} – коефіцієнт охоплення.

Стандартна відносна невизначеність за типом В викликана присутніми у вимірювальному тракті шумами, визначається за формулою:

$$u_B(noise) = \frac{\Delta_{noise}}{k_{noise}} \cdot 100\% \quad (4.6)$$

де Δ_{noise} – розширена невизначеність за типом В викликана адитивними у вимірювальному тракті шумами;

k_{noise} – коефіцієнт охоплення.

Стандартна відносна невизначеність за типом В, обумовлена розрядністю ЦАП генератора визначається за формулою:

$$u_B(res. gen) = \frac{V_{gen range}}{V_{nom} \cdot 2^{bits} \cdot \sqrt{3}} \cdot 100\% \quad (4.7)$$

де $V_{gen range}$ – діапазон сигналів, В;

V_{nom} – номінальне значення сигналу;

$bits$ – розрядність ЦАП генератора.

Сумарна невизначеність за типом В при вимірюваннях при урахуванні незалежності складових :

$$u_B(NkMMP) = \sqrt{u_B(osc)^2 + u_B(res. gen)^2 + u_B(noise)^2} \quad (4.8)$$

Стандартні невизначеності типу А, при багатократних вимірюваннях вхідних величин амплітуди на референсній ділянці $u_A(Aref)$ контролю та в зоні контролю $u_A(Acont)$ визначались за формулою:

$$u_A(EAref) = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (Aref_n - \bar{Aref})^2}{N(N-1)}} \quad (4.9)$$

$$u_A(EAcont) = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (Acont_n - \bar{Acont})^2}{N(N-1)}} \quad (4.10)$$

де A_n – значення вхідної величини при n -му вимірюванні;

$\bar{A}$ – усереднене значення вхідної величини;

N – кількість багатократних вимірювань.

Невизначеність типу А вимірювань при ультразвуковому контролі оцінюється за формулою:

$$u_A(NkMMP) = \frac{1}{\bar{Aref}} \sqrt{(u_A(Aref))^2 + (u_A(Acont))^2} \cdot 100\% \quad (4.11)$$

Сумарна стандартна невизначеність вимірювань амплітудних характеристик при ультразвуковому контролі визначається за формулою:

$$u_C(NkMMP) = \sqrt{u_A(NkMMP)^2 + u_B(NkMMP)^2} \quad (4.12)$$

Розширена стандартна невизначеність результатів вимірювання при коефіцієнті охоплення $k_{exp} = 2$ визначається за формулою:

$$U(NkMMP) = k_{exp} \cdot u_C(NkMMP) \quad (4.13)$$

Оцінка достовірності при проведенні ультразвукового магнітострикційного неруйнівного контролю виконується за співвідношенням:

$$D(\delta_{NkMMP}) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \delta_{NkMMP}} \int_{-\delta_{NkMMP}}^{\delta_{NkMMP}} \exp\left(\frac{(Acont-x)^2}{-2(\delta_{NkMMP})^2}\right) dx \quad (4.14)$$

$$\text{де } \delta_{NkMMP} = \frac{U(NkMMP)}{2} \cdot \frac{\bar{Aref}}{100};$$

Під час формування звіту наводяться данні про застосоване обладнання, схема випробувань, перелік додаткового обладнання та проводиться порівняльний аналіз амплітуд сигналу в досліджуваних зонах. Для ділянок, де амплітуда сигналу в об'єкті контролю нижча за референтне значення, додаються відповідні осцилограми.

4.2 Експериментальне визначення часу затримки сигналів в ММП.

Для визначення залежності вимірюного сигналу від часу затримки сигналів в ММП, перетворювачі було як показано на рис. 4.1.



Рисунок 4.1. Розташування перетворювачів при визначенні часу затримки сигналів в ММП.

В розділі 3 наведенні основні технічні характеристики ультразвукової системи збирання та аналізу вимірюваних даних з малоапертурними магнітострикційними перетворювачами, яка була використана при проведенні експериментальних досліджень.

В Таблиці 4.1 наведені основні технічні характеристики допоміжного обладнання, яке використовувалось при проведенні експериментальних досліджень

Таблиця 4.1 Основні технічні характеристики допоміжного обладнання

Ноніусний штангенциркуль	0..200 мм
Антистатичний настільний килим	Розміри 300 x 450мм
Осцилограф INSTRUSTAR ISDS205	Смуга пропускання: 20 МГц Кількість каналів: 2 канали Швидкість вибірки: 48 МВ/с (Real time) Об'єм пам'яті буфера 1МБ/канал Імпеданс: 1том 25pF Розрішення по вертикалі: 8 біт Діапазон посилення: від -6 до 6 В (зонд X1), від -60 до 60 В (зонд X10) Точність: $\pm 3\%$ Час розгортки: 1 нс - з 20

На рис.4.2 зображена схема лабораторного стенду який використовувався для дослідження характеристик ММП.



Рисунок 4.2. Схема лабораторного стенду

Система формувала ультразвуковий імпульс із робочою частотою 0,5 МГц. Ультразвукова хвиля поширювалася через випромінювач, пружні коливання були зафіксовані ММП приймачем і були відтворенні в вигляді графічного зображення на екрані осцилографа.

Для підтвердження стабільності отриманих експериментальних даних, проводилося біля десяти серій незалежних вимірювань по три повторювання.

Результати трьох повторювань першої серії наведено на рис. 4.3.

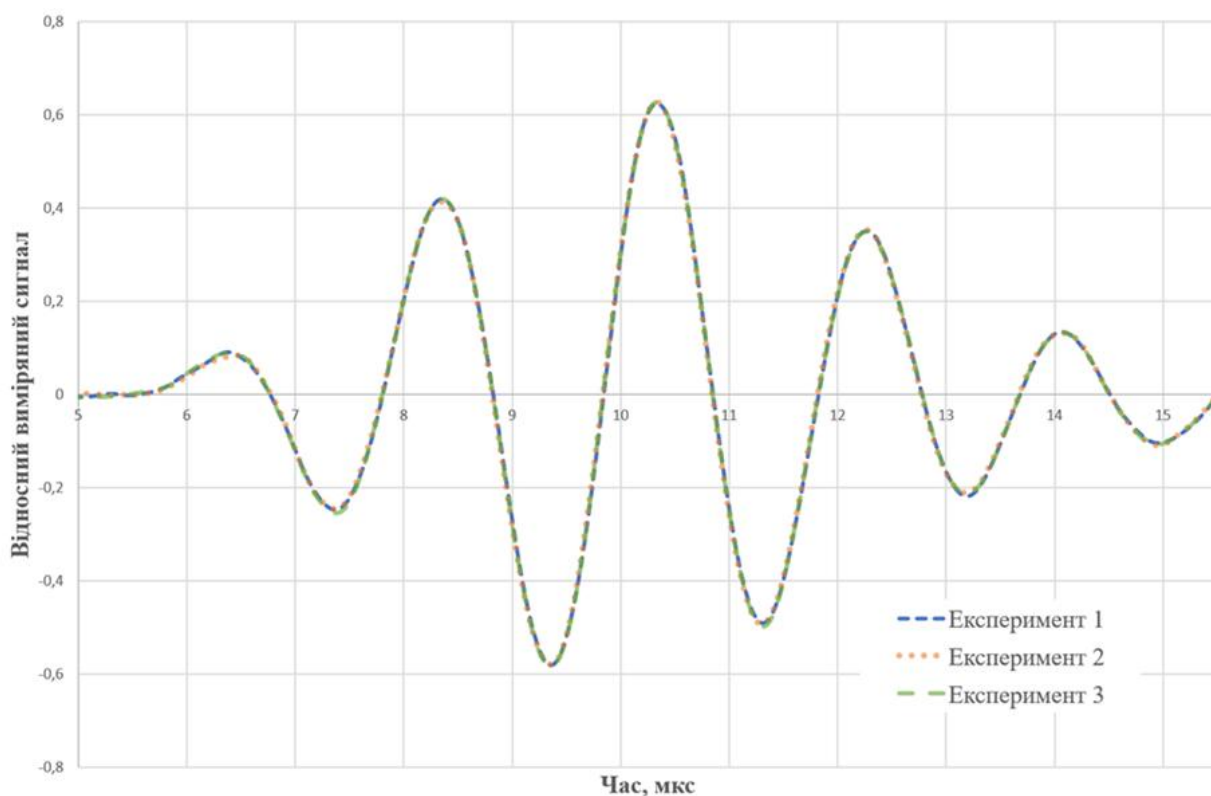


Рисунок 4.3. Залежності виміряного сигналу від часу затримки в ММП.

Після опрацювання отриманих експериментальних результатів було встановлено час затримки в сенсорах який дорівнює $5,88 \pm 0,02$ мкс.

Проведені експериментальні дослідження виміряного сигналу від часу в малоапертурних магнітострикційних перетворювачах [99], проведених з використанням запропонованого алгоритму, показали відтворюваність форми зондуючих імпульсів в проведених експериментах.

4.3 Експериментальне оцінювання відтворюваності ММП-сигналів в умовах структурної однорідності матеріалу

Дослідження проводились з використанням ультразвукової системи збирання та аналізу вимірних даних з малоапертурними магнітострикційними перетворювачами за алгоритмом проведення випробувань який передбачає визначення амплітуди сигналу та часу затримки.

Ціллю проведення досліджень було визначення параметрів проходження імпульсу: часу затримки та амплітуди сигналу. Дослідження повинні були підтвердити відтворюваність ММП-сигналів в ізотропному середовищі

Експериментальне оцінювання відтворюваності ММП-сигналів в умовах структурної однорідності матеріалу здійснювалося поетапно.

На першому етапі досліджень проводилась підготовка об'єкта та обладнання.

Об'єктом дослідження було обрано ізотропний фрагмент сталі марки 0,8кп, що характеризується низьким вмістом вуглецю та високою пластичністю
рис. 4.4

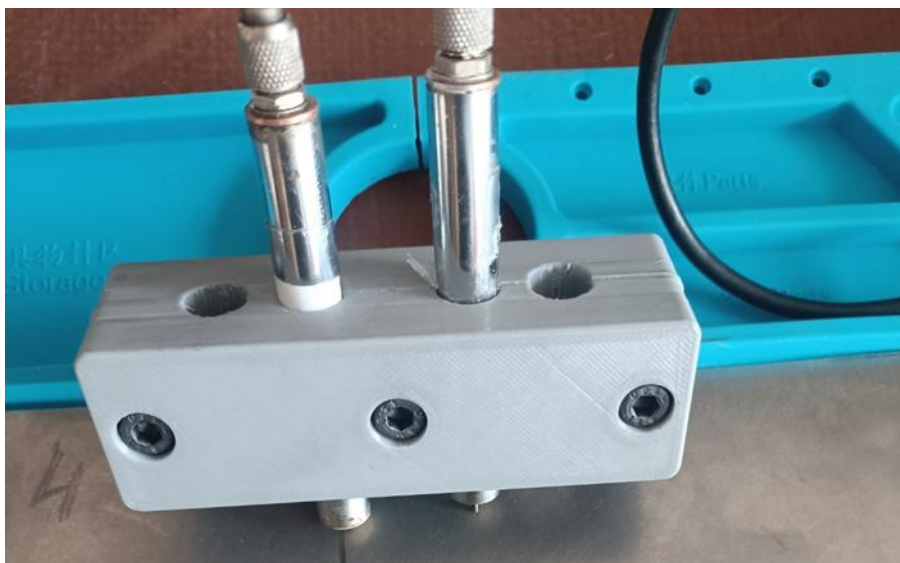


Рисунок 4.4 Зразок для проведення досліджень ізотропного фрагменту

Дослідження проводились на зразках Сталі марки 0,8кп яка відноситься до сплавів з низьким вмістом вуглецю. Вона широко застосовується для виробництва листового, фасонного і сортового металопрокату, а також зварних та безшовних труб і дроту різного діаметру. Таке масове застосування обумовлено доступною ціною, хорошими показниками пластичності й технологічних властивостей.

При проведенні досліджень використовувалась ультразвукова система з використанням малоапертурних магніострикційних сенсорів наведена на рисунку 4.5

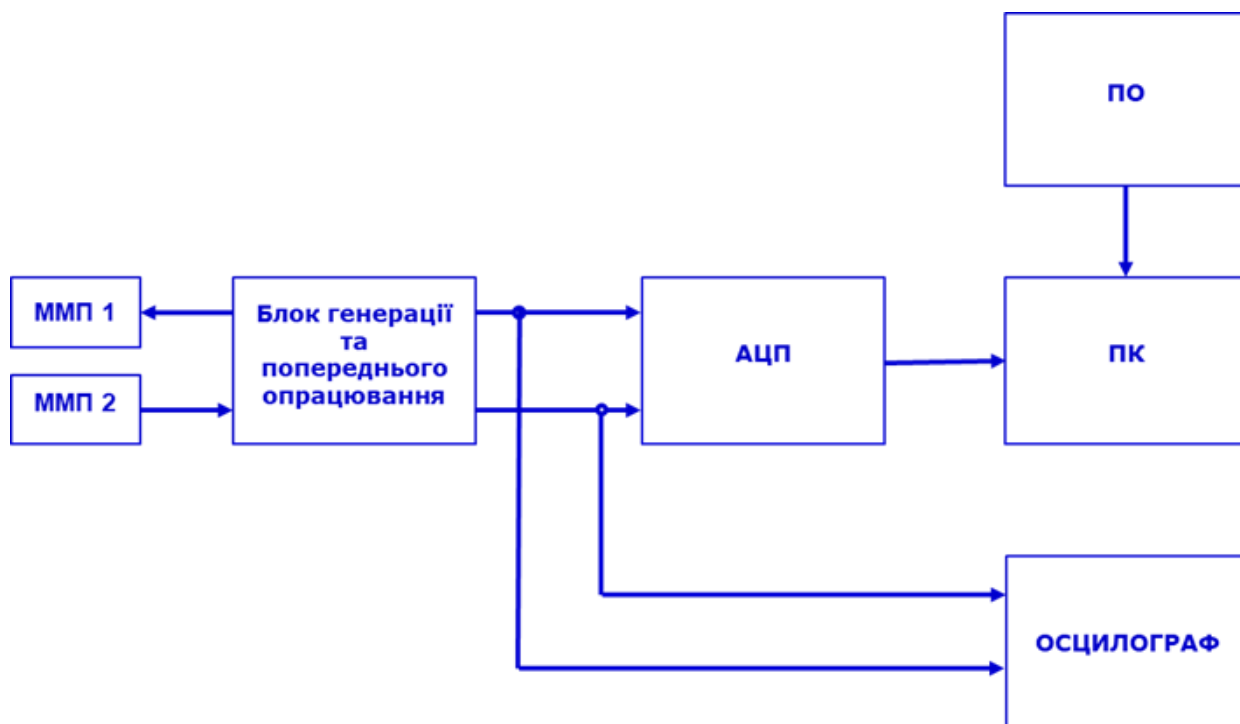


Рисунок 4.5 Ультразвукова система з використанням малоапертурних магнітострикційних сенсорів.

Для проведення вимірювань використовувався спеціалізований тримач, що забезпечував фіксовану відстань між ММП-перетворювачами 25 мм, робоча частота перетворювачів дорівнювала 0,5 МГц, напруга на випромінювачах була в межах від 0 ... 10 В на навантаженні 0,5 Ом.

На наступному етапі, в зразках Сталі марки 0,8кп, при використанні ММП, ультразвукова хвиля поширювалась у досліджуваний об'єкт, сигнали ММП-приймача надходили в АЦП і після перетворення у цифрову форму передавались в апаратно-програмний модуль. Цей модуль виконував операції усереднення даних, фільтрації, оцінювання часових та амплітудних параметрів сигналів, збереження отриманих даних та їх візуалізацію. Приклад отриманого сигналу ММП-приймача наведено на рис. 4.6.

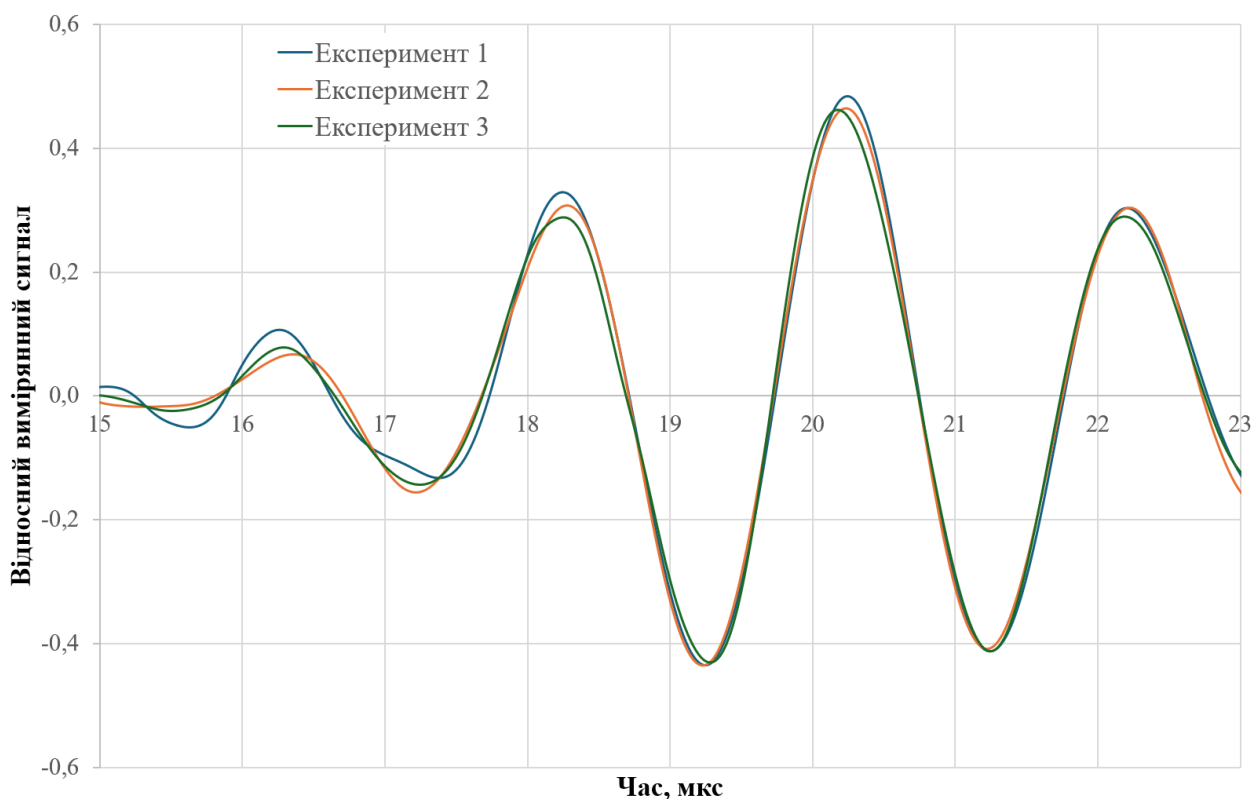


Рисунок 4.6. Отриманий сигнал в ізотропному середовищі.

Для проведення досліджень кінетики поширення пружних хвиль в ізотропних фрагментах сталі марки 0,8кп було використано метод ультразвукового контролю з використанням малоапертурних магніострикційних перетворювачів (ММП).

За результатами отриманих дослідних даних був побудований графік залежності виміряного сигналу та часу в зразках. Результати аналізу отриманої осцилограми (рисунок 4.6) продемонстрували наступні закономірності:

Максимальні амплітудні значення сигналу досягають позначки $\pm 0,4$ – $0,50$ відносних одиниць.

Інтервал корисного сигналу, що пройшов крізь матеріал лежить в межах 17–28 мкс.

Ключовою особливістю графіка є накладання кривих трьох різних експериментів. Повний збіг фазових та амплітудних характеристик усіх трьох ліній свідчить про відсутність випадкових похибок та високу прецизійність проведених експериментальних досліджень.

4.4 Експериментальне визначення амплітудно-часових залежностей ММП-сигналів від геометричних параметрів об'єкта контролю

Для проведення експериментальних досліджень для визначення амплітудно-часових залежностей ММП-сигналів від геометричних параметрів об'єкта контролю були використані зразки зі сталі марки Ст3сп різної товщини. Це вуглецева сталь звичайної якості [401], яка використовується для виготовлення несучих елементів зварних і незварних конструкцій і деталей, товстолистового і тонколистового прокату, сортових та фасонних профілів, труб різного призначення й перетину. Хімічний склад сталі марки Ст3сп відповідає вимогам стандартів ДСТУ 2651

Для проведення експериментальних дослідів були відібрані зразки з різними геометричними розмірами .

Перший зразок з геометричними параметрами 100мм x 50мм x1,0 мм на Рисунку 4.7



Рисунок 4.7 Зразок з товщиною 1 мм

Другий зразок з геометричними параметрами 100мм x 50мм x2,0 мм на Рисунку 4.8



Рисунок 4.8 Зразок з товщиною 2,0 мм

Третій зразок з геометричними параметрами 100мм x 50мм x2,5 мм на Рисунку 4.9



Рисунок 4.9 Зразок з товщиною 2,5 мм

При проведенні експериментальних досліджень були визначенні параметри імпульсу: амплітуда сигналу та час затримки.

На першому етапі здійснювалась фільтрація сигналу для зменшення рівня шуму [95]. Однак, цей процес може призвести до зсуву початку сигналу та збільшення похибки при визначенні часу затримки [405, 406].

На другому етапі виконувалась оцінювання часу затримки та амплітуди сигналу.

На третьому етапі, забезпечувалось створення цифрових образів сигналів, візуалізація та збереження результатів.

На Рисунку 4.10 наведено приклад досліджень зразків зі сталі марки Ст3сп, які мають різну товщину. Для мінімізації похибок при визначенні часу затримки та амплітуди застосовувалася цифрова фільтрація, яка дозволила виділити корисний сигнал на фоні шумі

При проведенні експериментальних досліджень виявлено зниження амплітуди від товщини експериментального зразка

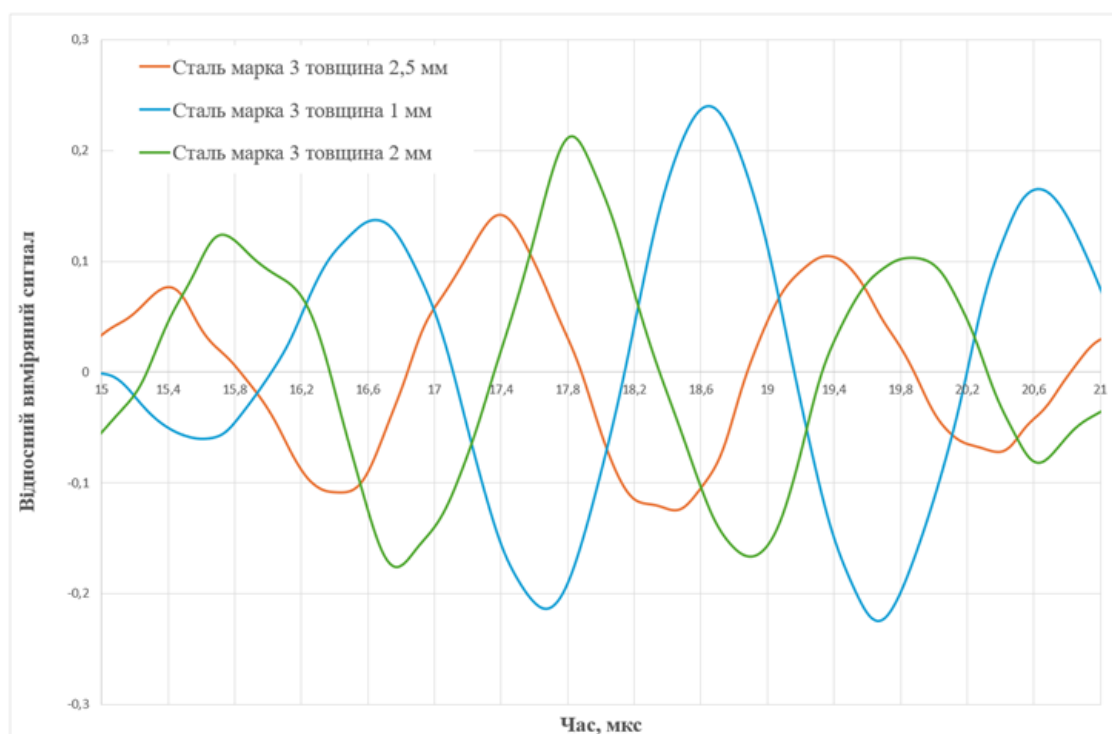


Рисунок 4.10 Результати досліджень зразків зі сталі марки Ст3сп

Осцилограми, отримані за допомогою апаратно-програмного модуля, відображають динаміку зміни виміряного сигналу в часовому діапазоні від 15 до 21 мкс. На графіку чітко спостерігається зсув фаз та зміна амплітуди залежно від

товщини матеріалу. Хвильові пакети для зразка товщиною 1 мм (синя лінія) мають найбільшу інтенсивність. період коливань та час затримки сигналу варіюються залежно від товщини, що пояснюється дисперсійними властивостями хвиль Лемба в тонколистовому прокаті.

Побудовані залежності виміряного сигналу та часу в зразках виявили чітку залежність амплітуди виміряного сигналу від товщини зразка. При збільшенні товщини матеріалу, амплітуда виміряного сигналу зменшується.

На Рисунку 4.11 зображено побудовану залежність амплітуди сигналу в залежності від товщини зразка.

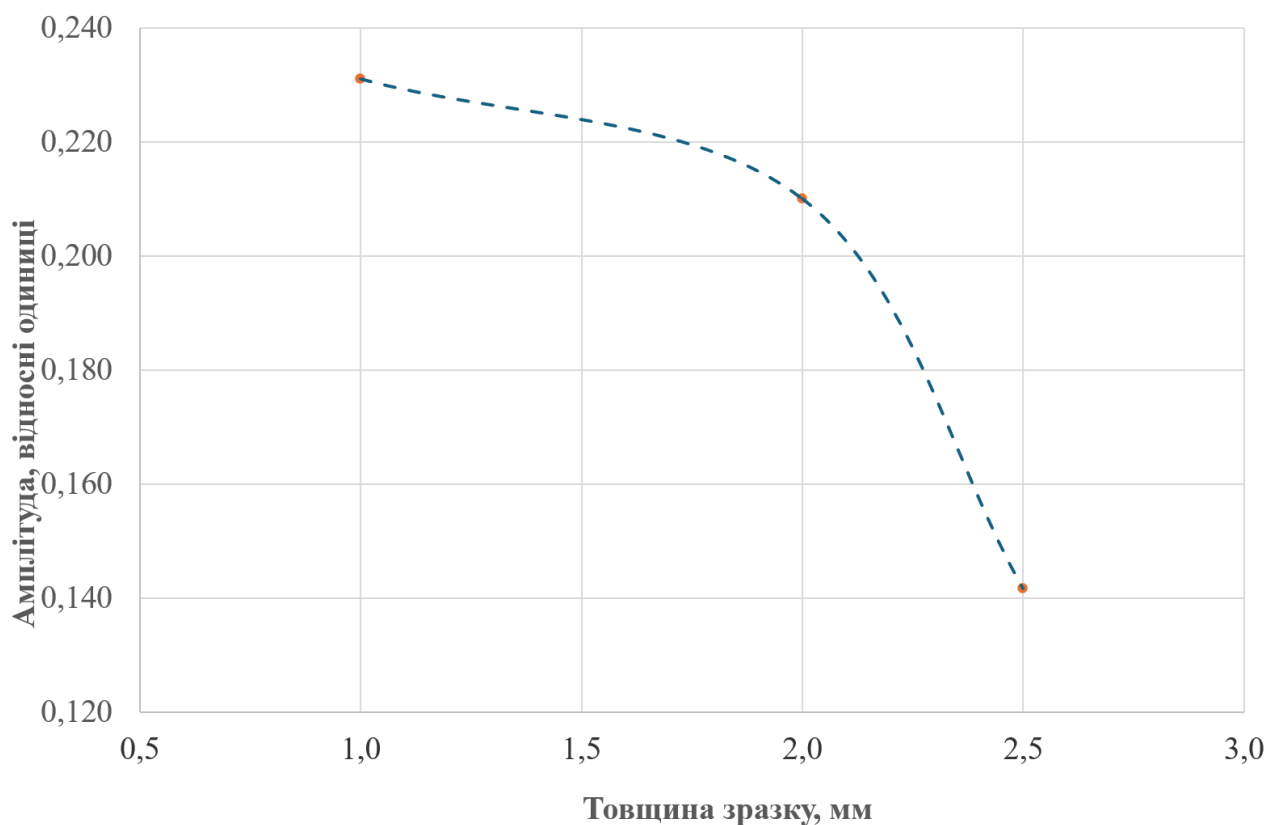


Рисунок 4.11 Залежність амплітуди сигналу в залежності від товщини зразка.

Графік на Рисунку 4.11 представляє результат експериментальних досліджень, які демонструють стійку обернено пропорційну залежність між товщиною зразка та амплітудою ММП-сигналу. При збільшенні товщини матеріалу з 1,0 мм до 2,5 мм спостерігається лінійне зниження амплітуди (відносні одиниці) з приблизно 0,23 до 0,14. Таке зниження амплітуди зі

зростанням товщини пояснюється перерозподілом енергії пружної хвилі в більшому об'ємі матеріалу, що призводить до зменшення питомої потужності сигналу, який фіксується ММП-приймачем.

Побудовані залежності виміряного сигналу та часу в зразках дали змогу зафіксувати чітку залежність амплітуди виміряного сигналу від товщини зразка. При збільшенні товщини матеріалу, амплітуда виміряного сигналу зменшується. Це дає можливість використання амплітудних характеристик як ідентифікаційного параметра для визначення товщини або виявлення локальних змін геометрії об'єктів контролю зі сталі.

4.5 Визначення порогів чутливості на зразках із локальними дефектами для методу ультразвукового магнітострикційного неруйнівного контролю

Метою даного етапу досліджень було визначення здатності малоапертурних магнітострикційних перетворювачів фіксувати локальні дефекти (отвори) малого діаметра в тонколистовому зразку зі сталі марки 0,8кп товщиною 0,5 мм.

При проведенні експериментальних досліджень використовувалась Ультразвукова система з використанням малоапертурних магнітострикційних сенсорів

Для визначення порогів чутливості на зразках із локальними дефектами для методу ультразвукового магнітострикційного неруйнівного контролю був використаний зразок сталі марки 0,8кп. На зразку з геометричними розмірами 200x200x05,5 мм були зроблені отвори різного діаметру: 1мм, 2мм, 3мм. Отвори розташовувалися прецизійно посередині між точками контакту ММП перетворювачів. Дослідження проводились з наступними вихідними даними: частота заповнюючого колювання – 0,5 МГц; частота повторення імпульсу – 20 Гц; відстань між ММП перетворювачами – 25 мм; На рис. 4.12 представлений експериментальний зразок з отворами.



Рисунок 4.12 Зразок з отворами.

Завданням дослідження було проведення експериментальних досліджень використовуючи ультразвукову системи збирання та аналізу вимірних даних з малоапертурними магнітострикційними перетворювачами та знаходження параметрів імпульсу амплітуди сигналу та часу затримки.

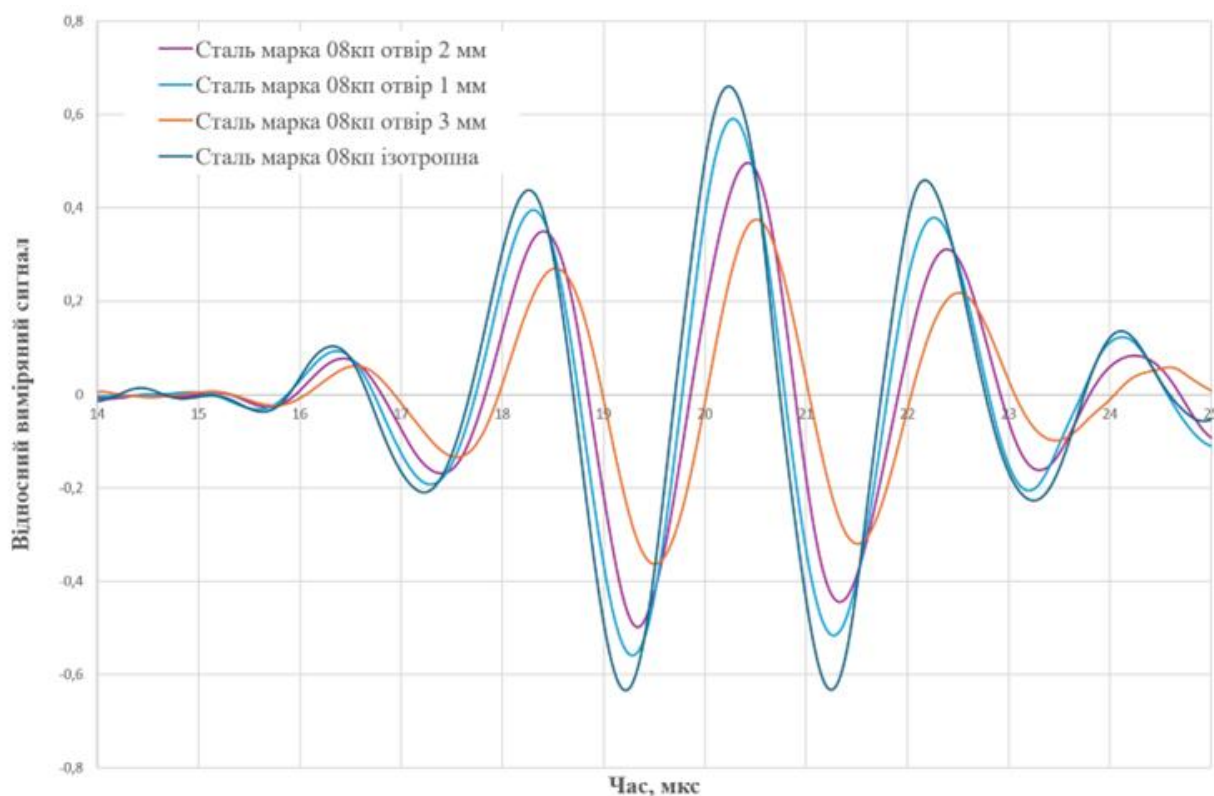


Рисунок 4.13. Результати експериментів на отворах з різним діаметром і ізотропній ділянці зразка

Перетворювачі встановлювалися в спеціальну оправку-тримач із заданою відстанню між ММП. На зразок, перетворювачі встановлювались таким чином, що отвори розташовувались посередині між точками контакту хвилеводів ММП з пластиною.

На Рисунку 4.13 наведені результати експериментів на отворах з різним діаметром і ізотропній ділянці зразка.

Наведений графік на Рисунку 4.13 ілюструє зміну характеристик прийнятого сигналу при взаємодії акустичної хвилі з дефектами різного розміру в порівнянні з бездефектною (ізотропною) ділянкою. На графічному зображенні спостерігається чітка закономірність зниження максимальної амплітуди сигналу при збільшенні діаметра отвору. Найвищий рівень сигналу відповідає ізотропній ділянці (фіолетова лінія), тоді як мінімальний — зразку з отвором 3 мм (помаранчева лінія).

Окрім амплітудних змін, на часовій шкалі (діапазон 18–24 мкс) помітні незначні зсуви сигналів.

Характер кривих підтверджує, що амплітуда виміряного сигналу є чутливим діагностичним параметром, який дозволяє не лише виявити наявність дефекту, а й оцінити його відносний розмір

При проведенні опрацювання експериментальних даних була побудована залежність амплітуди прийнятого сигналу від діаметру отвору представлена на Рисунку 4.14.

Побудовані залежності виміряного сигналу та часу в зразках виявили залежність амплітуди виміряного сигналу від діаметру отвору: при збільшенні діаметру отвору, в контрольному зразку, амплітуда виміряного сигналу зменшується.

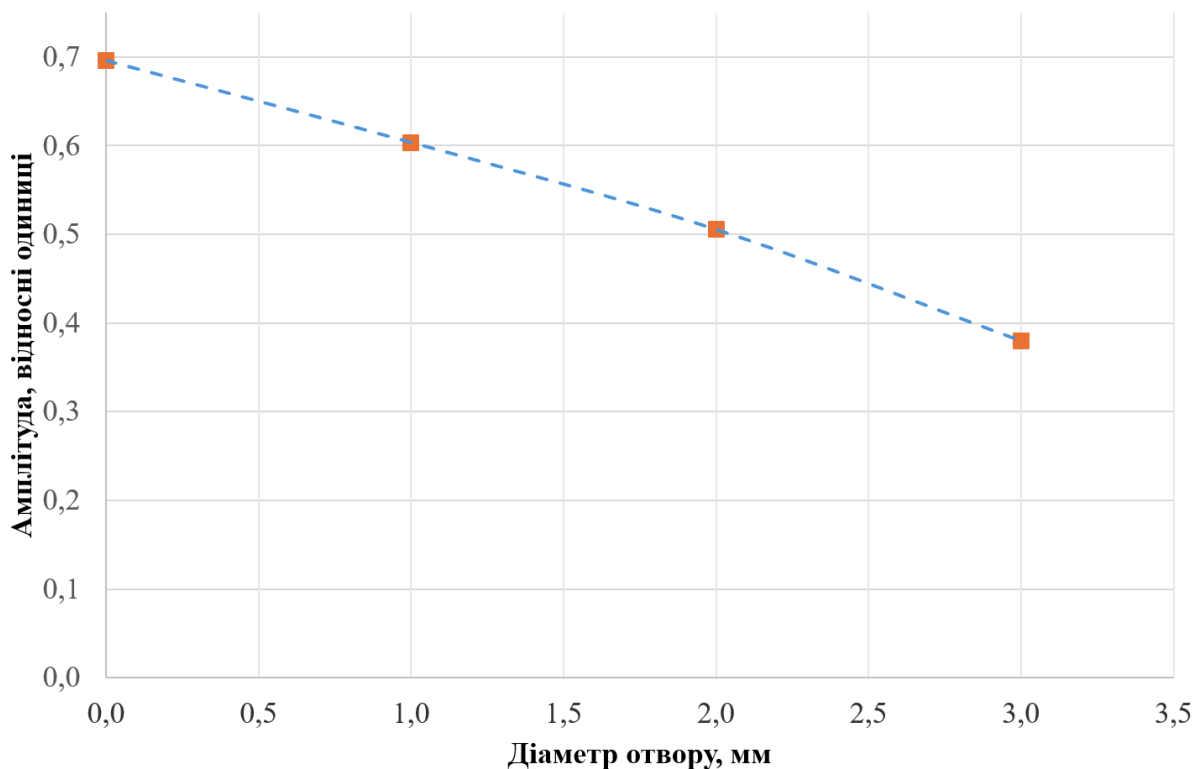


Рисунок 4.14 Залежність амплітуди прийнятого сигналу від діаметру отвору

4.6 Визначення швидкості розповсюдження ультразвукового сигналу в зразках з різною товщиною для методу ультразвукового магнітострикційного неруйнівного контролю.

Метою даного етапу досліджень було проведення експериментів для визначення швидкості розповсюдження ультразвукового сигналу в зразках зі СтЗсп товщиною 0,5 мм; 1,0 мм.

Експериментальні дослідження проводились ультразвуковою системою на двох різних відстанях між малоапертурними магнітострикційними перетворювачами. Сенсори були розташовані, один відносно другого, на відстані 25 мм та 55 мм.

Для визначення швидкості ультразвукового сигналу були використані три зразка зі СтЗсп з наступними геометричними розмірами: 1) 200x200x0,5 мм; 2) 200x200x2,0 мм. Дослідження проводились на ізотропних ділянках з наступними вихідними даними: частота заповнюючого коливання – 0,5 МГц; частота

повторення імпульсу – 20 Гц; відстань між ММП перетворювачами – 25 мм; - 55мм.

Завданням дослідження було проведення експериментальних досліджень використовуючи ультразвукову системи збирання та аналізу вимірних даних з малоапертурними магнітострикційними перетворювачами для визначення швидкості ультразвукової хвилі в об'єкті контролю та підтвердженні відтворюваності експериментальних даних.

На Рисунку 4.15 наведені результати експериментів для товщини пластини 0.5мм, які фіксують часову та амплітудну характеристики отриманих сигналів в залежності від відстані між перетворювачами.

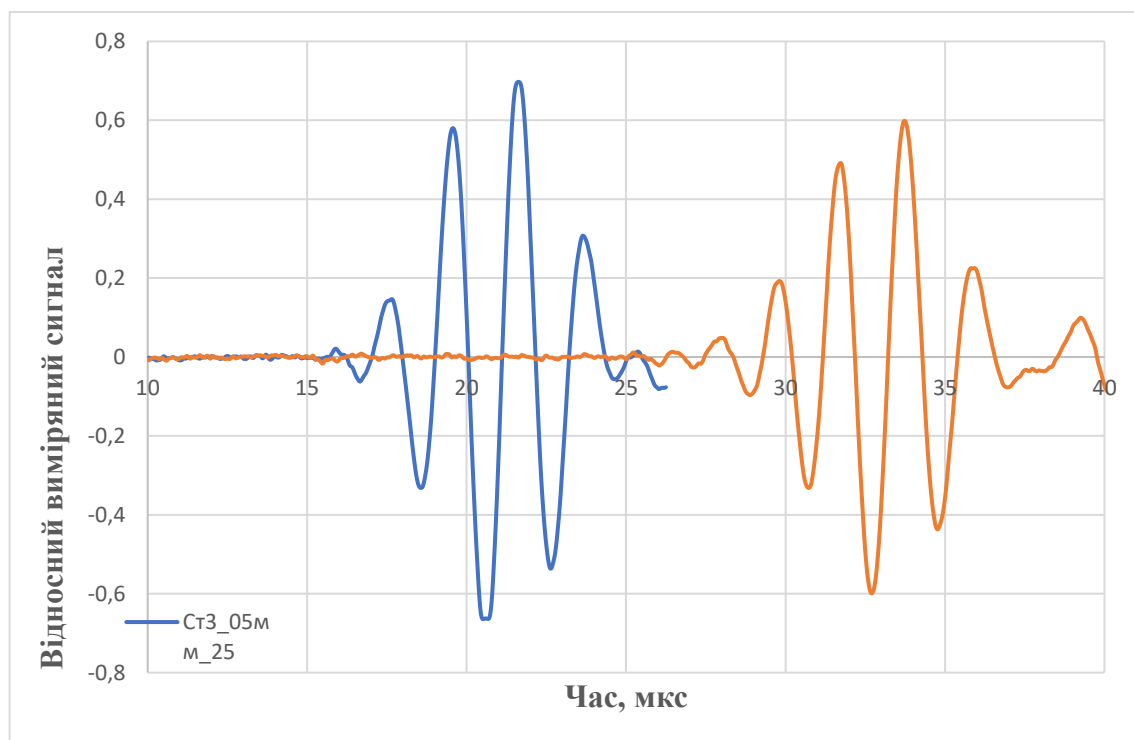


Рисунок 4.15. Результати досліджень на ізотропній ділянці зразка з товщиною 0,5 мм з розташуванням перетворювачів на відстані 25 мм та 55 мм

Використання спеціального тримача дозволило розташувати сенсори із заданою відстанню між ММП, після чого перетворювачі встановлювались на ізотропну ділянку зразка.

Визначена максимальні амплітуди сигналів та відповідний час при відстані між ММП 25 мм та 55 мм для зразка з товщиною 0,5 мм (Таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 Результати досліджень на ізотропній ділянці зразка з товщиною 0,5 мм з розташуванням перетворювачів на відстані 25 мм та 55 мм

Експеримент	Час, мкс	Амплітуда, відносні одиниці
СтЗсп товщина 0,5 мм, відстань між ММП 25 мм	21,73	0,7
СтЗсп товщина 0,5 мм, відстань між ММП 55 мм	33,79	0,59

Швидкість хвилі в зразку визначається за формулою

$$v = L / (t_{55} - t_{25}),$$

Швидкість хвилі в зразку СтЗсп розмірами 200x200x0,5 мм становить

$$v = (0,03) / (33,79 \cdot 10^{-6} - 21,73 \cdot 10^{-6}) = 2488 \text{ м/с}.$$

Відповідно до теоретичних розрахунків, які наведені в розділі 2 пункту 2.6, для пластини товщиною 0,5 мм при частоті 0,5 МГц швидкість склала 2492,78 м/с.

Відносне відхилення між теоретичними и експериментальними результатами склало 0,2 %

Аналогічно попередньому експерименту був проведений експеримент на зразку з товщиною 1,0 мм.

На Рисунку 4.16 наведені результати експериментів для товщини пластини 1мм, які фіксують часову та амплітудну характеристики отриманих сигналів в залежності від відстані між перетворювачами.

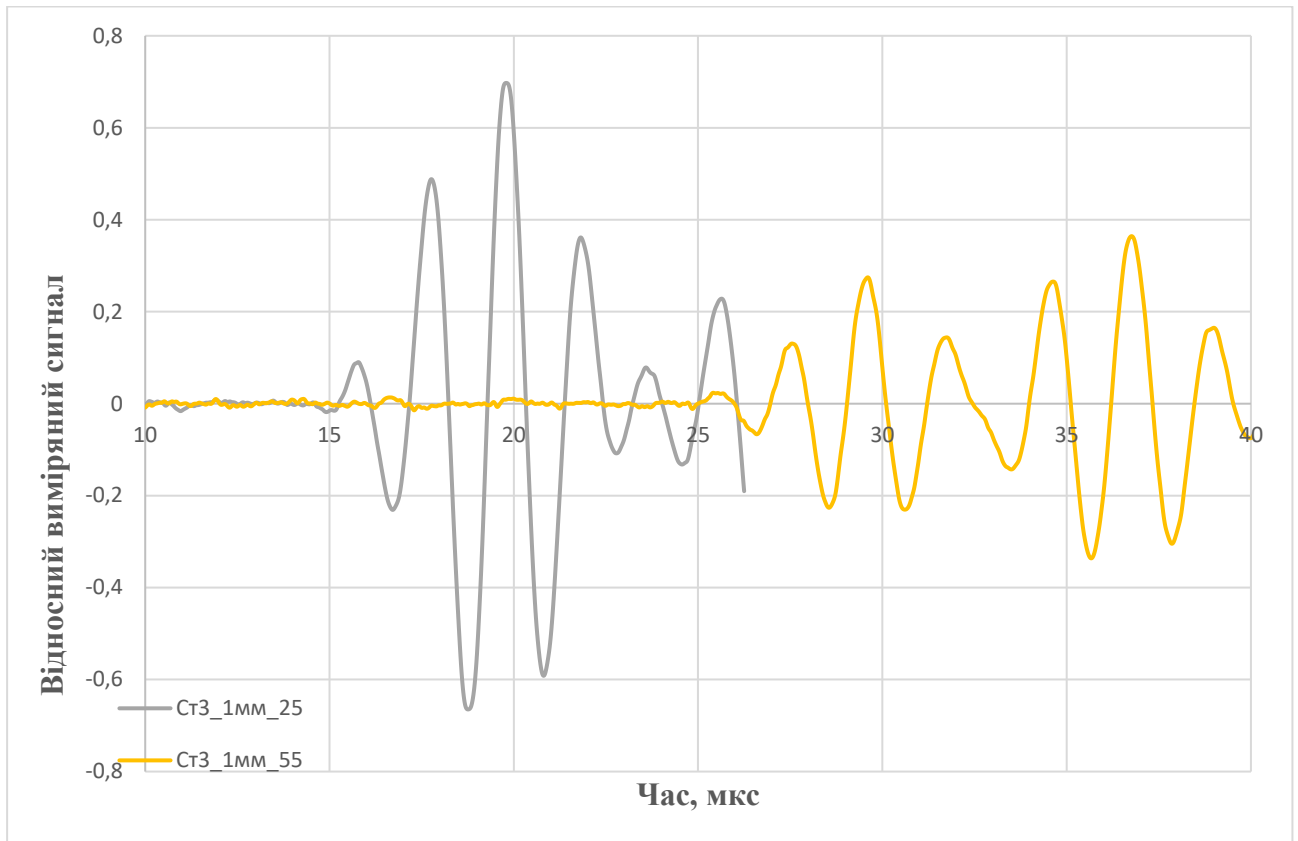


Рисунок 4.16. Результати досліджень на ізотропній ділянці зразка з товщиною 1 мм з розташуванням перетворювачів на відстані 25 мм та 55 мм

Визначена максимальні амплітуди сигналів та відповідний час при відстані між ММП 25 мм та 55 мм для зразка з товщиною 1,0 мм (Таблиця 4.3).

Таблиця 4.3 Результати досліджень на ізотропній ділянці зразка з товщиною 0,5 мм з розташуванням перетворювачів на відстані 25 мм та 55 мм

Експеримент	Час, мкс	Амплітуда, відносні одиниці
Ст3сп товщина 1 мм, відстань між ММП 25 мм	19,9	0,7
Ст3сп товщина 1 мм, відстань між ММП 55 мм	29,69	0,59

Швидкість хвилі в зразку визначається за формулою

$$v = L / (t_{55} - t_{25}),$$

Швидкість хвилі в зразку Ст3сп розмірами 200x200x1,0 мм становить

$$v = (0,03) / (29,69 \cdot 10^{-6} - 19,9 \cdot 10^{-6}) = 3064 \text{ м/с}$$

Відповідно до теоретичних розрахунків, які наведені в розділі 2 пункту 2.6, для пластини товщиною 1 мм при частоті 0,5 МГц швидкість склала 2949,89 м/с. Відносне відхилення між теоретичними і експериментальними результатами склало 3,9 %.

4.6 Апробація розробленого алгоритму при контролі зварних з'єднань різного ступеня обробки

Процес експериментального дослідження зварних з'єднань за допомогою малоапертурних магнітострикційних перетворювачів ММП складався з наступних кроків:

Спочатку була сформована вибірка дослідних зразків:

Зразок 1 - зварний шов без додаткової механічної обробки рис. 4.17; зразок 2 - зварний шов із проведеною механічною обробкою поверхні рис. 4.18; зразок 3 - зварний шов із внесеним штучним дефектом рис. 4.19.



Рисунок 4.17 Зразок зварного шва без обробки

Після встановлення малоапертурних магнітострикційних перетворювачів ММП на досліджувані ділянки зварних швів, через апаратно-програмний модуль були згенеровані ультразвукових імпульси.

Хвилі, які пройшли крізь зону зварного шва, реєструвались ММП-приймачем. Після перетворення механічних коливань у електричний сигнал, його було оцифровано за допомогою АЦП, після фільтрації шумів був виділений корисний сигнал.



Рисунок 4.18 Зразок зварного шва з обробкою.



Рисунок 4.19 Зразок зварного шва з дефектом.

На наступному етапі була побудована порівняльна осцилограма для бездефектних та дефектних зон зварного з'єднання Рисунок 4.20.

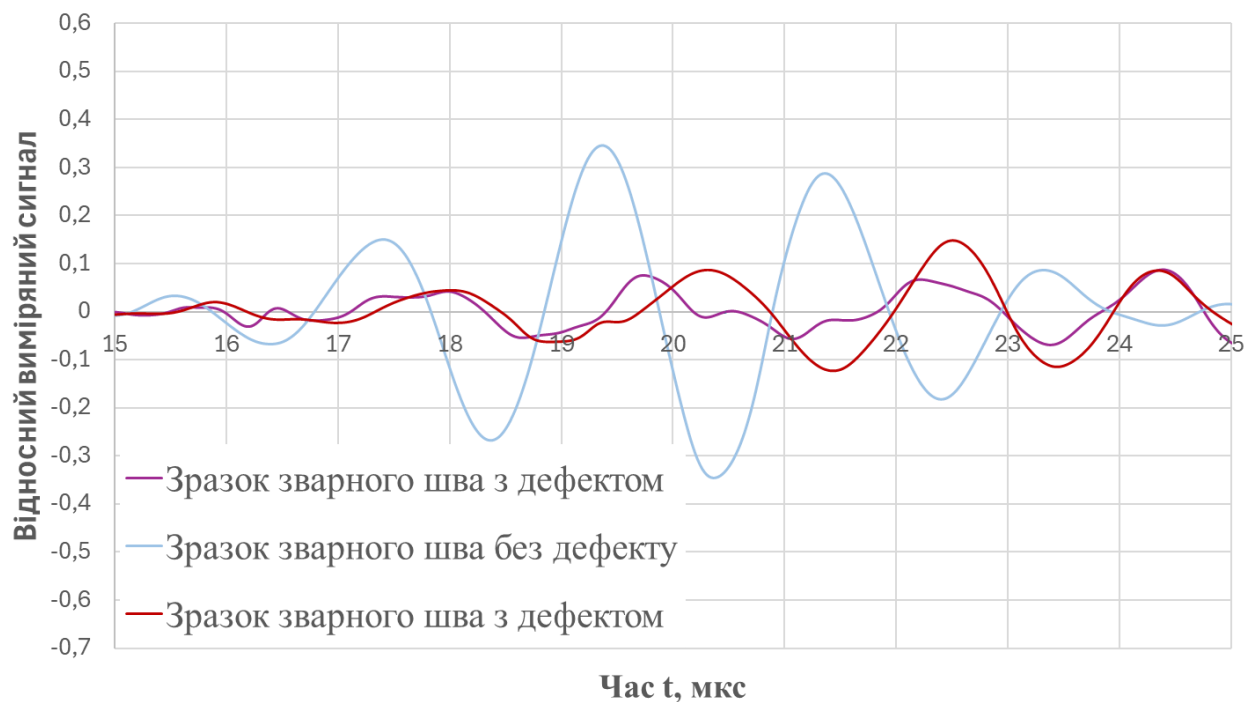


Рисунок 4.20. Порівняльна осцилограма для бездефектних та дефектних зон зварного з'єднання.

Графік на Рисунку 4.20 ілюструє залежність відносного виміряного сигналу від часу для різних станів зварного шва. Зразок зварного шва без дефекту (блакитна лінія) демонструє чітко виражену хвильову структуру з високою амплітудою (пікові значення до 0,35–0,4 відн. од.). Це свідчить про стабільне поширення пружної хвилі крізь однорідне середовище зварного з'єднання.

Зразок зварного шва з дефектом (бордова та червона лінії) фіксує зниження амплітуди сигналу (максимум до $\sim 0,15$ відн. од.).

Попри різке падіння амплітуди в дефектних зонах, загальна структура сигналу (чергування максимумів і мінімумів у часі) зберіглась, що дозволило ідентифікувати саме сигнал на фоні завад.

Амплітуда сигналу виступає надійним діагностичним параметром: її зменшення однозначно вказує на наявність внутрішніх або поверхневих дефектів у зварному з'єднанні.

Результати експериментів доводять, що метод ММП у поєднанні з програмним опрацюванням дозволяє чітко диференціювати бездефектні ділянки

зварного шва та місця в яких в зварному шві наявні дефекти за рівнем згасання амплітуди ультразвукових хвиль.

4.7 Порівняльний аналіз результатів експериментальних досліджень неруйнівного ультразвукового контролю з використанням ММП та методу радіографічного контролю

Для проведення порівняльного аналізу було обрано фрагмент елементу корпусу зварної конструкції з алюмінієвого сплаву з розмірами ДхШхВ 215х155х90 мм та товщиною $T_{\max}=3,5$ мм, який наведено на рисунку 4.21



Рисунок 4.21 Фрагмент елементу корпусу зварної конструкції.

Обраний фрагмент розбито на зони в яких виконувався неруйнівний ультразвуковий контроль [94 з використанням ММП згідно з алгоритмом наведеним в пункті 4.1.

Отримано зниження амплітуди виміряного сигналу в зоні 5 в порівнянні з зоною 7. Результати наведенні на рисунку 4.22.

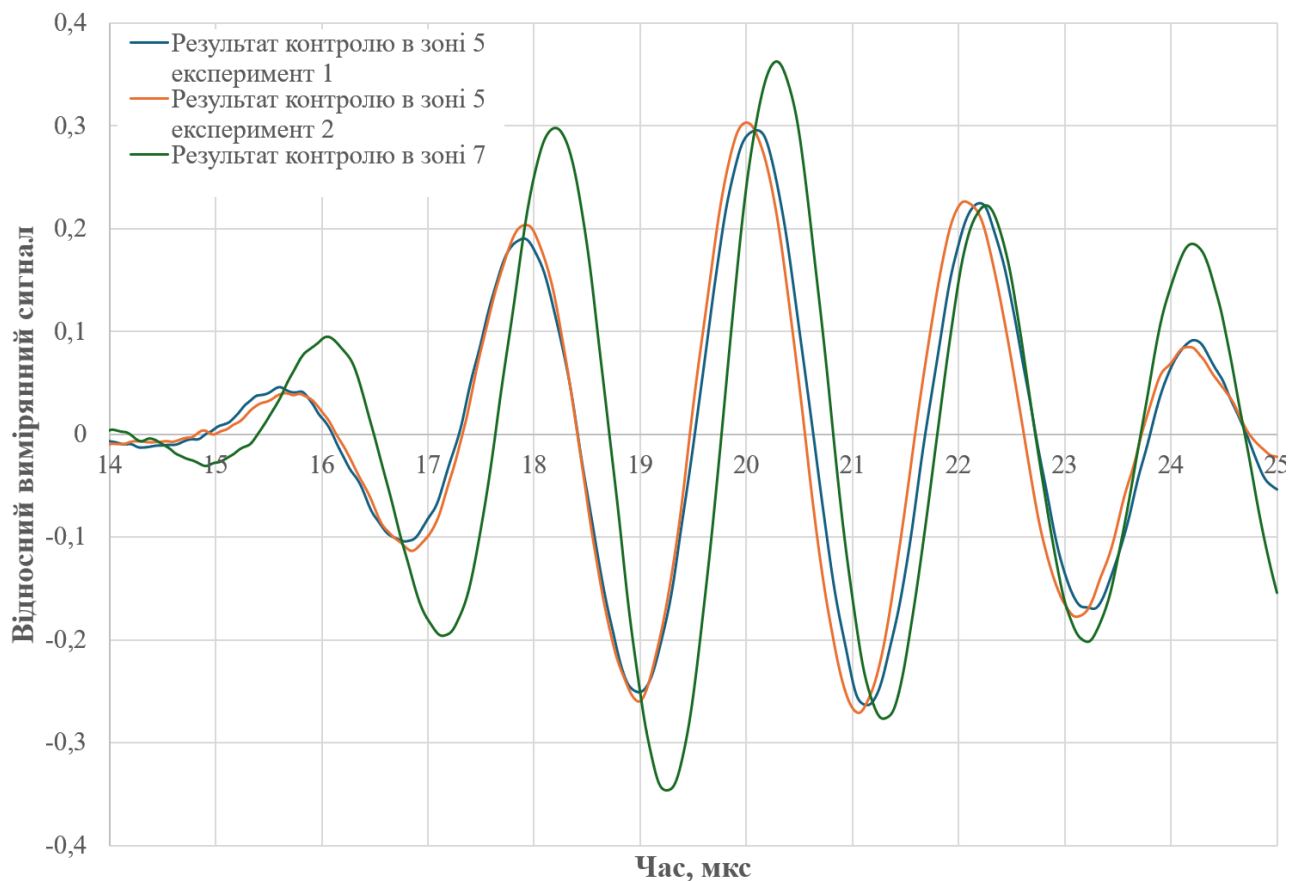


Рисунок 4.22 Осцилограма досліджень в зонах контролю 5 та 7.

Радіологічний контроль проведено в «Лабораторія рентгенівського контролю ІЕЗ ім. Є.О. Патона» згідно методики контролю «ДСТУ EN ISO 17636-2:2014 Неруйнівний контроль зварних швів. Радіографічний контроль. Частина 2. Способи контролю рентгенівським і гамма-випромінюванням із застосуванням цифрових детекторів (EN ISO 17636-2:2013, IDT)».

Перелік використаного обладнання наведено в таблиці 4.2, а параметри контролю в таблиці 4.3

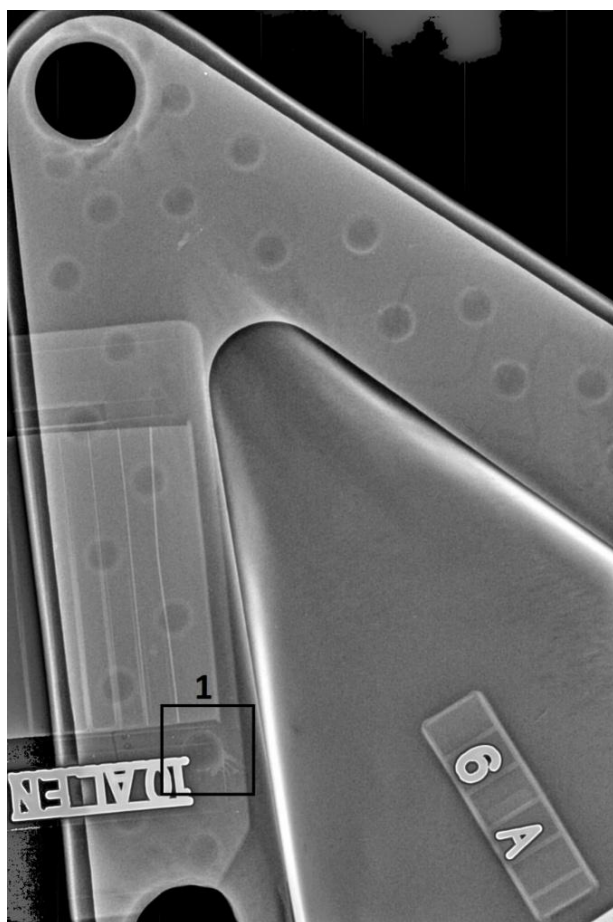
За результатами радіографічного контролю, які наведені на рисунку 4.22 а,б, виявлені артефакти що відповідають візуально видимим пошкодженням захисного покриття, вм'ятинами та рискам навколо отворів від монтажу та порушення технології точкового зварювання, вірогідно пропал з виливом рідкої фази у міжшаровий проміжок.

Таблиця 4.4

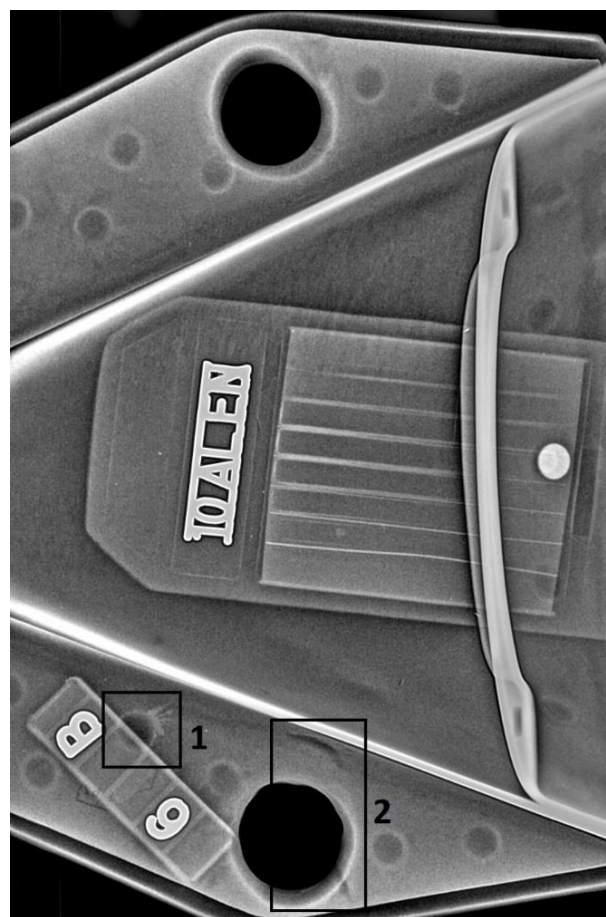
№	Обладнання та матеріали
1	Переносний промисловий рентгенапарат SITEX CP-225D, Teledyne ICM
2	Портативний цифровий рентгенівський детектор GO-SCAN 1510 HR
3	Еталон чутливості 10 AL EN
4	Лінійка металева Л-300 (300 мм)
5	Лупа вимірювальна ЛІ-3-10Х
6	Дозиметр Терра МКС-05

Таблиця 4.5 Параметри контролю

Товщина, що просвічується, мм / penetrated thickness, mm	3,5 мм
Прискорююча напруга, кВ / X-ray tube voltage, kV	100 кВ;
Струм мА / Current, mA	3,0
Час експозиції, хв. / Exposure time, min	40 сек.
Фокусна відстань, мм / Focal length, mm	850 мм
Розмір фокусної плями, мм / Focal size, mm	3,0



а)



б)

Рисунок 4.22 Знімки Радіографічного контролю зразку.

Маркер відмічений на рис. 4.22 позначкою збігається з зоною контролю 5. Отримані результати свідчать про збіг результатів радіографічного контролю зразку згідно ДСТУ EN ISO 17636-2:2014 та результатів неруйнівного контролю ультразвукового контролю з використанням ММП.

Проведено аналіз невизначеностей вимірювання згідно з алгоритмом наведеним пункті 4.1 результати наведено в таблиці 4.5

Таблиця 4.5 Аналіз невизначеностей при проведенні контролю з використанням ММП

Невизначеність	Тип оцінки	%
Складова невизначеності осцилографа $u_B(osc)$	B	1,73
Складова невизначеності, обумовлена розрядністю ЦАП генератора $u_B(res. gen)$	B	0,03
Складова невизначеності вимірювань викликана присутніми у вимірювальному тракті шумами $u_B(noise)$	B	1,44
Сумарна невизначеність за типом B $u_B(NkMMP)$	B	2,25
Стандартна складова невизначеності амплітуди на референсній ділянці $u_A(Aref)$	A	1,75
Стандартна складова невизначеності амплітуди на контрольній ділянці $u_A(Acont)$	A	3,15
Сумарна невизначеність за типом A $u_A(NkMMP)$	A	3,60
Розширена стандартна невизначеність результатів вимірювання при коефіцієнті охоплення 2	A,B	8,50

Встановлено, що відносна розширена невизначеність при проведенні досліджень склала 8.5%.

4.8 Висновки до розділу 4

Удосконалено алгоритм ультразвукового контролю зварних з'єднань з використанням ММП, визначено границі параметрів контролю, що дало змогу знизити час на проведення досліджень зразків та вплив суб'єктивного фактору при проведенні контролю – амплітуди, фази та затримки.

Експериментально встановлено залежність між амплітудою виміряного сигналу та діаметром отворів (1–3 мм) у контрольних зразках зі сталі 08кп. Підтверджено, що амплітуда сигналу зменшується пропорційно збільшенню діаметра отвору.

На основі експериментальних досліджень зразків зі Сталі 3 різної товщини із застосуванням розробленого алгоритму контролю встановлено характер залежності амплітуди інформаційного сигналу від параметрів об'єкта. Отримані результати підтвердили, що амплітуда виміряного сигналу зменшується пропорційно зростанню товщини досліджуваного матеріалу

Проведено порівняльний аналіз результатів експериментальних досліджень неруйнівного ультразвукового контролю з використанням ММП та методу радіографічного контролю. Отримані результати свідчать про збіг результатів радіографічного контролю зразку згідно ДСТУ EN ISO 17636-2:2014 та результатів неруйнівного контролю ультразвукового контролю з використанням ММП.

Проведено верифікацію швидкості розповсюдження хвиль в зразках товщиною 0,5 мм та 1 мм, встановлено що відносне відхилення між експериментальними та теоретичними значеннями не перевищує 3.9 %.

ВИСНОВКИ

Отримані в дисертаційній роботі результати в сукупності є вирішенням науково-практичної задачі, що полягає в удосконаленні ультразвукового магніто-стрикційного методу неруйнівного контролю шляхом покращення метрологічних характеристик перетворювачів та вдосконалення методів опрацювання інформаційних сигналів.

1. Запропоновано удосконалену математичну модель сигналів магнітострикційного перетворювача з урахуванням геометричних розмірів електричних котушок виявлено специфічні амплітудно-часові особливості радіоімпульсів. Це дозволило розробити підхід до підвищення точності вимірювання часових затримок сигналів під час їх поширення у вимірювальному тракті.

2. Запропоновано застосування дискретного перетворення Гільберта у методі оцінювання параметрів сигналів дозволило встановити характер впливу магнітострикції на форму імпульсу. Доведено, що цей вплив супроводжується деформацією обвідної та появою додаткової затримки відносно сигналу збудження, що необхідно враховувати для достовірного визначення амплітудно-часових характеристик

3. Вдосконалено комплексну інформаційно-вимірювальну технологію, що поєднує вдосконалену конструкцію перетворювача, методологію опрацювання сигналів на основі перетворення Гільберта та концепцію вимірювальних інструментів, забезпечила розширення функціональних можливостей методу. Це дозволило автоматизувати опрацювання вимірювальної інформації та процес прийняття рішень при виконанні неруйнівного контролю.

4. Розроблено апаратно-програмний модуль у вигляді віртуального приладу, що реалізує алгоритми фільтрації, визначення інформаційних параметрів та архівації даних. Це дозволило автоматизувати процес діагностики та суттєво скоротити час на опрацювання результатів експериментальних досліджень.

5. Обґрунтовано вибір конструктивних параметрів магнітострикційних перетворювачів, зокрема застосування сплаву 49КФ для хвилеводу та двосекційної обмотки котушок. Реалізація режиму синфазного підсумування сигналів у циклах випромінювання та прийому забезпечила зростання амплітуди корисного сигналу та підвищення загальної чутливості контролю.

6. На основі математичного моделювання процесів поширення хвиль Лемба у пластинах виконано верифікацію їхньої швидкості для зразків товщиною 0,5 мм та 1 мм і встановлено, що відносне відхилення між експериментальними та теоретичними значеннями не перевищує 3,9 %

7. На основі експериментальних досліджень зразків зі сталі 3 та зварних з'єднань підтверджено ефективність розробленого алгоритму контролю, який дозволяє стабільно виявляти дефекти та оцінювати стан швів незалежно від способу їх обробки. Встановлено, що характер зміни амплітуди інформаційного сигналу перебуває у зворотній пропорційній залежності від товщини досліджуваного матеріалу.

8. Експериментально підтверджено можливість використання ультразвукового магнітострикційного методу для контролю елементів обладнання складної форми шляхом порівняння отриманих результатів із даними стандартизованого радіографічного контролю згідно з вимогами ДСТУ EN ISO 17636-2:2014.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Hassani, S., Dackermann, U. (2023) A Systematic Review of Advanced Sensor Technologies for Non-Destructive Testing and Structural Health Monitoring. *Sensors*, 23(4), 2204. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23042204>.
2. Aquil Ahmad, Leonard J. Bond. (2018) Nondestructive evaluation and quality control, *Metals Handbook*, V. 17, Ninth Edition. American Society for Metals, ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v17.9781627081900>.
3. Hellier, C. (2001) *Handbook of Nondestructive evaluation*. McGraw-Hill.
4. Bray, D.E., Stanley, R.K. (2018) *Nondestructive Evaluation: A Tool in Design, Manufacturing, and Service*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315272993>.
5. Kuzina, E., Rimshin, V., Kurbatov, V.(2018) The Reliability of Building Structures Against Power and Environmental Degradation Effects. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 463(4). DOI: 10.1088/1757-899X/463/4/042009.
6. Poduval'tsev, V.V., Khlystunov, M.S., Mogilyuk, Z.G. (2013) Reliability of the Results of Dynamic Inspections of Buildings and Structures. *Meas. Tech.*, 56. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0294-y>.
7. Babak, V.P., Babak, S.V., Myslovych, M.V., Zaporozhets, A.O., Zvaritch, V.M. (2020). Principles of Construction of Systems for Diagnosing the Energy Equipment. In: *Diagnostic Systems For Energy Equipments. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 281, pp. 1-22. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3_1/
8. Kim,W., Katipamula, S. (2017) A review of fault detection and diagnostics methods for building systems. *Sci. Technol. Built Environ*, 24. DOI: 10.1080/23744731.2017.1318008.
9. Бабак В.П., Куц Ю.В., Богачев І.В. та ін. (2020) Розроблення методу, методики та засобів контролю елементів будівельних машин та металевих конструкцій з використанням магнітострикційного ефекту, *Технічна діагностика*

- та неруйнівний контроль. – 2020. – №4.– С.32–39. DOI: doi.org/10.37434/tdnk2020.04.05.
10. Babak, V., Isaienko, V., Zaporozhets, A. (2020). Systems, Decision and Control in Energy I, 298. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2>
 11. Babak, V.P., Babak, S.V., Eremenko, V.S., Kuts, Y.V. et. al. (2021) Models and Measures for the Diagnosis of Electric Power Equipment. In: Models and Measures in Measurements and Monitoring. Studies in Systems, Decision and Control, vol 360, pp 99–126. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70783-5_4
 12. Babak, V.P., Babak, S.V., Myslovych, M.V. et al. (2018) Information Provision of Diagnostic Systems for Energy Facilities, Kyiv: Akadempriodyka, DOI: <https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.353.134>.
 13. Mičić, M., Brajović, L., Lazarević, L., Popović, Z. (2023) Inspection of RCF rail defects – Review of NDT methods. Mechanical Systems and Signal Processing, 182, 1, 109568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109568>.
 14. Romanenko V., Kovtun S. (2024) Technology of Quality Control of Additive Manufacturing Products During Printing of Elements of Energy Complexes. System Research in Energy, 4(80). DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.110>.
 15. Ramírez, I.S., Márquez, F.P.G., Papaelias, M. (2023) Review on additive manufacturing and non-destructive testing. J. of Manufacturing Systems, 66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.12.005>.
 16. Honarvar, F., Varvani-Farahani, A. (2020) A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control. Ultrasonics, 108, 106227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106227>.
 17. Babak, V.P., Babak, S.V., Eremenko, S. et al. (2025) Information-Measuring Systems Theory and Application, Studies in Systems, Decision and Control (SSDC, volume 592). Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-89406-0.
 18. Куц, Ю. В., & Щербак, Л. М. (2009). *Статистична фазометрія* (383 с.). Тернопіль: Тернопільський державний університет ім. І. Пулюя. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/5217>.

19. Mei, Z., Kuts, Y., Kochan, O. et al. (2022) Using signal phase in computerized systems of non-destructive testing, *Measurement science review*, 22, (2022), No 1, DOI: <https://doi.org/10.2478/msr-2022-0004>.
20. Куц, Ю. В., Монченко, О. В., Бистра, І. М., & Олійник, Ю. А. (2019). *Фазовий метод ультразвукової луна-імпульсної товщинометрії виробів з конструкційних матеріалів*, 192 с. Київ: Інтерсервіс. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/31941>.
21. Zinno, R.; Haghshenas, S.S.; Guido, G.; Vitale, A. (2022) Artificial intelligence and structural health monitoring of bridges: A review of the state-of-the-art. *IEEE Access* 10, 88058–88078. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3199443.
22. Elenchezian, M.R.P.; Vadlamudi, V.; Raihan, R.; Reifsnider, K.; Reifsnider, E. (2021) Artificial intelligence in real-time diagnostics and prognostics of composite materials and its uncertainties –A review. *Smart Materials and Structures*, 30(8). DOI: 10.1088/1361-665X/ac099f.
23. Perfetto, D., De Luca, A., Perfetto, M., Lamanna, G., Caputo, F. (2021) Damage Detection in Flat Panels by Guided Waves Based Artificial Neural Network Trained through Finite Element Method. *Materials*, 14(24), 7602. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14247602>.
24. Posilović, L., Medak, D., Milković, F., Subašić, M., Budimir, M., Lončarić, S. (2022) Deep learning-based anomaly detection from ultrasonic images. *Ultrasonics*, 124, 106737. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2022.106737>.
25. Malekloo, A., Ozer, E., AlHamaydeh, M., Girolami, M. (2022) Machine learning and structural health monitoring overview with emerging technology and high-dimensional data source highlights. *Structural Health Monitoring*, 21(4). DOI: 10.1177/14759217211036880.
26. Carlin, B. (1960) *Ultrasonics*, Chapter 4, Magnetostriction, Second edition, McGraw-Hill Book Company, Inc., pp.93-125.
27. Ekreem, N.B., Olabi, A.G., Prescott, T., Rafferty, A., Hashmi M.S.J. (2007) An overview of magnetostriction, its use and methods to measure these properties. *J. of Materials Processing Technology* 191 (1-3). DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.03.064.

28. Цапенко, В. К., & Куц, Ю. В. (2009). Основи ультразвукового неруйнівного контролю [Електронний ресурс] (448 с.). Київ: НТУУ «КПІ». <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/303>.
29. Kim, Y. Y., Kwon, Y. E. (2015). Review of magnetostrictive patch transducers and applications in ultrasonic nondestructive testing of waveguides. *Ultrasonics*, 62. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.05.015>.
30. Сенсори систем моніторингу теплотехнічного обладнання на основі магнітострикційного ефекту. (2015). В: Бабак, В. П., Бабак, С. В., Берегун, В. С. та ін.; за ред. чл.-кор. НАН України В. П. Бабака, *Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики*, с. 273–316. Київ: ТОВ «Поліграф-Сервіс». <https://ela.kpi.ua/items/e344f26e-649e-415f-8275-ba1e5f8a8d10>.
31. Calkins, F.T., Flatau, A.B., Dapino, M.J. (2007) Overview of magnetostrictive sensor technology. *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, 18. DOI: 10.1177/1045389X06072358.
32. Kim, Y., Kim, Y.Y. (2007) A novel Terfenol-D transducer for guided-wave inspection of a rotating shaft. *Sensors and Actuators A: Physical*, 133 (2). <https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.05.006>.
33. Kim, J., & Jung, E. (2005). Finite element analysis for acoustic characteristics of a magnetostrictive transducer. *Smart Materials and Structures*, 14(6), 1273–1280. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/14/6/020>.
34. Zheng, X. J., Liu, X. E. (2005) A nonlinear constitutive model for Terfenol-D rods. *J. of Applied Physics*, 97 (5), 053901. <https://doi.org/10.1063/1.1850618>.
35. Chen, Y., Yang, X., Yang, M., Wei, Y., Zheng, H. (2021) Characterization of Giant Magnetostrictive Materials Using Three Complex Material Parameters by Particle Swarm Optimization, *Micromachines*, 12(11), 416. <https://doi.org/10.3390/mi12111416>.
36. Vinogradov, S., Chen, X., Cobb, A., & Fisher, J. (2023). Applications of Linear Scanning Magnetostrictive Transducers (MST) for Finding Hard-to-Detect Anomalies in Structural Components. *Proceedings of the European Conference on Non-*

Destructive Testing (ECNDT) from 3 to 7 of July 2023 in Lisbon, Portugal. Research and Review Journal of Nondestructive Testing, Vol. 1(1). <https://doi.org/10.58286/28141>.

37. Vinogradov, S., & Fisher, J. (2018). Review of Guided Wave Testing Using Magnetostrictive Transducers. 12th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2018), Gothenburg 2018, June 11-15. e-Journal of Nondestructive Testing, Vol. 23(8). <https://www.ndt.net/?id=22930>.

38. Oh, S.-B., Cheong, Y.-M., Lee, D.-H., & Kim, K.-M. (2019). Magnetostrictive guided wave technique verification for detection and monitoring defects in the pipe weld. *Materials*, 12(6), 867. <https://doi.org/10.3390/ma12060867>.

39. Puchot, A., Duffer, C., Cobb, A., & Light, G. (2010). New Magnetostrictive Sensor Technology Applications. 5th Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition, 9-11 Nov 2009, Bahrain. <https://www.ndt.net/?id=8564>.

40. Kwun, H., & Teller, C. M. (1996). Nondestructive evaluation of pipes and tubes using magnetostrictive sensors. U.S. Patent No.5581037, G01N 29/14; G01N 29/28. U.S. Patent and Trademark Office. Filed Mar. 9, 1995, Date of Patent: Dec. 3, 1996. <https://patents.google.com/patent/US5581037A>.

41. Hristoforou, E., & Kosmas, K. (2007). Magnetostrictive delay lines for non-destructive testing. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 25(1–4), 287–296. <https://doi.org/10.3233/JAE-2007-794>.

42. Ashish, A. J., Rajagopal, P., Balasubramaniam, K., Kumar, A., Rao, B. P., & Jayakumar, T. (2017). Bulk ultrasonic NDE of metallic components at high temperature using magnetostrictive transducers. *AIP Conference Proceedings*, 1806(1). <https://doi.org/10.1063/1.4974604>.

43. Miao, H., & Li, F. (2021). Shear horizontal wave transducers for structural health monitoring and nondestructive testing: A review. *Ultrasonics*, 114, 106355. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2021.106355>.

44. Wang, H., Wu, B., Gao, X., Liu, Y., Li, X., & Liu, X. (2023). Ultrasonic guided wave defect detection method for tank bottom plate based on SH0 mode multichannel

- magnetostrictive sensor. Measurement, 223, 113790. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113790>.
45. Chen, X., Xu, J., Li, Y., & Wang, S. (2023). Characteristic parameters of magnetostrictive guided wave testing for fatigue damage of steel strands. *Materials*, 16(15), 5215. <https://doi.org/10.3390/ma16155215>.
 46. Bertoncini, F., Giunta, G., Raugi, M., & Turcu, F. (2012). Overview and Experimental Evaluation of Magnetostrictive Transducers for Guided Wave Inspection. *e-Journal of Nondestructive Testing*. <https://www.ndt.net/?id=13162>.
 47. Oh, S.-B., Cheong, Y.-M., Lee, D.-H., & Kim, K.-M. (2019). Magnetostrictive Guided Wave Technique Verification for Detection and Monitoring Defects in the Pipe Weld. *Materials*, 12(6), 867. <https://doi.org/10.3390/ma12060867>.
 48. Babak V.P., Bogachev I. A. (2016) Small aperture magnetostrictive sensors for non-destructive testing. "NDT days 2016", Sozopol, Bulgaria: Scientific Proceedings, 1(156).
 49. Bohachev, I., Babak, V., & Zaporozhets, A. (2022). Novel small-aperture transducers based on magnetostrictive effect for diagnostic systems. *Technical Electrodynamics*, 3(3), 69–78. <https://doi.org/10.15407/technd2022.03.069>.
 50. Bohachev, I., Kovtun, S., Kuts, Y., Sozonov, S., & Khaidurov, V. (2023). Enhanced phase method of signal detection for ultrasonic magnetostriction defectoscopy of power equipment. *System Research in Energy*, (2 (73), 72-82. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.072>.
 51. Babak, V., Zaporozhets, A., Khaidurov, V., Scherbak, L., Bohachev, I., Tsiupii, T. (2023). Mathematical Models and Software for Studying the Elasticity of Building Structures and Their Systems. In: Zaporozhets, A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 454. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_4.
 52. Бойко, А. П., Мамлюк, О. В., Терещенко, Ю. М., & Цибенко, В. М. (2001). Конструкція літальних апаратів, Київ: Вища освіта, 383 с.
 53. Осташ, О.П., Федірко, В. М., Учанін, В. М., та ін. (2007). Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник. Т.9: Міцність та

довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій (В. В. Панасюк, ред.). Львів: Сполом. – 1068 с.

54. Учанин, В. М., Карпаш, О. М., Войтенко, С. С., Іващенко, О. П., & Остап, О. П. (2025). Неруйнівний вихрострумовий контроль в системі технічного обслуговування літаків: сучасний стан і перспективи (Огляд). Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил, 2(84), 76–86. <https://doi.org/10.30748/zhups.2025.84.09>.

55. Джала, Р. М., Джала, В. Р., Івасів, І. Б., та ін. (2018). Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: довідниковий посібник у 8 т. Т. 4: Електрофізичні методи неруйнівного контролю дефектності елементів конструкцій (за заг. ред. З. Т. Назарчука, 354 с.). Київ: Простір-М. <https://old.nas.gov.ua/UA/Book/Pages/default.aspx?BookID=0000011414>.

56. Стрела, М. (2021). Методика оцінювання технічного стану силових елементів літаків-винищувачів за межами призначених показників. *Journal of Scientific Papers “Social Development and Security”*, 11(4), 129–139. <https://doi.org/10.33445/sds.2021.11.4.11>.

57. Коломійцев, О., Комаров, В., Гордієнко, А., Кулешов, О., Клівець, С., Шулежко, А., Олійник, Р., Живець, Ю., Шумигай, О. (2022). Автоматизований інформаційно-вимірювальний комплекс для проведення оперативного контролю технічного стану консольно закріплених конструкцій планера літального апарату. *Grail of Science*, (14-15), 190–200. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.27.05.2022.035>.

58. Коломійцев, О. В., & Комаров, В. О. (2022). Економічний ефект і порівняння виявлення тріщин у силових елементах крила літака методами неруйнівного контролю. In *Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference “International Scientific Innovations in Human Life”* (pp. 201–210). Manchester. <https://sci-conf.com.ua/x-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-international-scientific-innovations-in-human-life-13-15-aprelya-2022-goda-manchester-velikobritaniya-arhiv>.

59. Коломійцев, О. В., & Комаров, В. О. (2022). Вдосконалення системи технічного обслуговування і ремонту літальних апаратів на основі сучасних методів діагностування. In: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference “Science, Innovations and Education: Problems and Prospects” (pp. 21–27). Tokyo. <https://sciconf.com.ua/x-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-science-innovations-and-education-problems-andprospects-4-6-maya-2022-goda-tokio-yaponiya-arhiv>.
60. Babak, V. P., Bohachev, I. V., Dekusha, O. L., Kovtun, S. I., Kuts, Y. V., & Sozonov, S. V. (2025). Investigation of ultrasonic magnetostriction method of ultrasonic control. Part 1. Application of magnetostriction effects in measurement and non-destructive testing systems (Review). *Tekhnichna Diahnostyka ta Neruinivnyi Kontrol* (Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing), 3, 5–14. <https://doi.org/10.37434/tdnk2025.03.01>.
61. Bendat, J. S., & Piersol, A. G. (2010). *Random data: Analysis and measurement procedures*. John Willey & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118032428>.
62. Куц, Ю. В., Учанін, В. М., Лисенко, Ю. Ю., & Левченко, О. Е. (2021). Застосування перетворення Гільберта для аналізу сигналів автоматизованого вихрострумowego контролю. Частина 1. Теоретичні аспекти використання перетворення Гільберта у вихрострумовой контролі. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 3, 7–13. <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.03.01>.
63. Куц, Ю. В., Учанін, В. М., Лисенко, Ю. Ю., Левченко, О. Е., & Богдан, Г. А. (2021). Застосування перетворення Гільберта для аналізу сигналів автоматизованого вихрострумowego контролю. Частина 2. Отримання вторинних діагностичних ознак та приклади реалізації. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 4, 11–18. <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.01>.
64. Babak, V., Zaporozhets, A., Kulyk, M., Kuts, Y., Scherbak, L. (2023). Application of Discrete Hilbert Transform to Estimate the Characteristics of Cyclic Signals: Information Provision. In: Zaporozhets, A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 454. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_5.

65. Kovtun , S., Kuts, Y., Malko, V., Fryz, M., Shcherbak, L., & Kuts, V. (2024). Application of Hilbert transform for power quality indicators monitoring in general purpose grids. *System Research in Energy*, (2 (77), 71-83. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.02.071>.
66. Cang Hui, Pietro Landi, Henintsoa Onivola Minoarivelo, Andriamihaja Ramanantoanina (2018). *Ecological and Evolutionary Modelling*. SpringerBriefs in Ecology. ISSN 2192-4759, ISSN 2192-4767 (electronic), ISBN 978-3-319-92149-5, ISBN 978-3-319-92150-1 (eBook). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92150-1>.
67. Zaporozhets, A., Khaidurov, V., Tsiupii, T. (2022). Creation of High-Speed Methods for Solving Mathematical Models of Inverse Problems of Heat Power Engineering. In: Zaporozhets, A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy III*. *Studies in Systems, Decision and Control*, vol 399. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87675-3_3.
68. Khaidurov, V., Yailymov, B., & Shelestov, A. (2023). Mathematical model for determining the geometric location of the environmental pollutant based on sensor data. *Proceedings of the 2023 IEEE 12th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*, 703-707. <https://doi.org/10.1109/IDAACS58523.2023.10348700>
69. Jagdev Singh, George A. Anastassiou, Dumitru Baleanu, Carlo Cattani, Devendra Kumar (2022). *Advances in Mathematical Modelling, Applied Analysis and Computation*. *Proceedings of ICMMAAC 2021*. *Lecture Notes in Networks and Systems*, Volume 415. Springer. ISBN: 9789811901782, 9789811901799. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-0179-9>.
70. Khaidurov, V., Tsiupii, T., & Zhovnovach, T. (2021). Modelling of ultrasonic testing and diagnostics of materials by application of inverse problems. *CEUR Workshop Proceedings*, 3039, 1–5. <https://ceur-ws.org/Vol-3039/short25.pdf>.
71. Parikshit Narendra Mahalle, Nancy Ambritta P., Sachin R. Sakhare, Atul P. Kulkarni (2023). *Foundations of Mathematical Modelling for Engineering Problem Solving*. Springer. *Studies in Autonomic, Data-driven and Industrial Computing*. ISBN: 9789811988271, 9789811988288. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-8828-8>.

72. Babak, V., Zaporozhets, A., Kuts, Yu., Shcherbak, L. (2022). Some features of Hilbert transform and their use in energy informatics. The problems of general energy, 1-2, 90-96. <http://jnas.nbuiv.gov.ua/article/UJRN-0001353870>.
73. King-Yeung Lam, Yuan Lou (2020). Introduction to Reaction-Diffusion Equations Theory and Applications to Spatial Ecology and Evolutionary Biology. Lecture Notes on Mathematical Modelling in the Life Sciences. ISSN 2193-4789, ISSN 2193-4797 (electronic), ISBN 978-3-031-20421-0, ISBN 978-3-031-20422-7 (eBook). <https://doi.org/10.1007/978-3-031-20422-7>.
74. Ovaskainen, O., & Abrego, N. (2020). Joint species distribution modelling with applications in R. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108591720>.
75. Steven A. Banwart and Donald L. Sparks (2017): Quantifying and Managing Soil Functions in Earth's Critical Zone Combining Experimentation and Mathematical Modelling. Advances in Agronomy, Volume 142, Pages 2-423 (2017). <https://doi.org/10.1016/978-0-12-812222-8>.
76. Fox, W.P., & West, R.D. (2024). Numerical Methods and Analysis with Mathematical Modelling (1st ed.). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781032703671>.
77. Zdzislaw Trzaska (2024). Mathematical Modelling and Computing in Physics, Chemistry and Biology: Fundamentals and Applications. Studies in Systems, Decision and Control, 495. Springer. ISBN: 3031399846, 9783031399848, 9783031399879, 9783031399855. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-39985-5>.
78. Larsen, R. W. (2011). LabVIEW for engineers. Prentice Hall. <https://plc4me.com/pdf-labview-for-engineers-by-ronald-w-larsen>.
79. Isen, F. W. (2008). DSP for MATLAB™ and LabVIEW™ III: Digital filter design. In: Synthesis Lectures on Signal Processing. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-02530-3>.
80. Agrawal, N., Kumar, A., Bajaj, V., & Singh, G. (2021). Design of digital IIR filter: A research survey. Applied Acoustics, 172, 107669. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107669>.

81. Palani, S. (2023). Design of IIR Digital Filters. In: Discrete Time Systems and Signal Processing. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32421-5_4.
82. Grivel, E., Berthelot, B., Colin, G., Legrand, P., & Ibanez, V. (2024). Benefits of Zero-Phase or Linear Phase Filters to Design Multiscale Entropy: Theory and Application. *Entropy*, 26(4), 332. <https://doi.org/10.3390/e26040332>.
83. Srivastava, S., Jain, S. (2021). Optimum Digital Filter Design for Removal of Different Noises from Biomedical Signals. In: Marriwala, N., Tripathi, C.C., Kumar, D., Jain, S. (eds) Mobile Radio Communications and 5G Networks. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 140. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7130-5_30.
84. National Instruments. (2024). Zero Phase Filter (Cascade, DBL) VI. <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview-api-ref/page/vi-lib/analysis/3filter-llb/zero-phase-filter-cascade-dbl-vi.html>.
85. Suganthy, M., Joy, S. I., & Sarala, B. (2019). LabVIEW based non-invasive single channel fetal electrocardiogram extraction. In: 2019 IEEE 1st International Conference on Energy, Systems and Information Processing (ICESIP), 1–5. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICESIP46348.2019.8938262>.
86. National Instruments. (2024). Peak Detector VI. <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview-api-ref/page/vi-lib/analysis/8numeric-llb/peak-detector-vi.html>.
87. Білокур І.П., Основи дефектоскопії: Підручник, 2004 р. 552 с, http://www.azimut-ukraine.com/ua/os_def.html.
88. Р. М. Галаган, Г. А. Богдан, Навчальний посібник КПІ — «Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю» (2021), <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/f38b61ef-5390-43ed-b059-4eeee78e830d/content>.
89. Галаган, Роман Михайлович Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю, 2019-03, <https://ela.kpi.ua/items/ef88516d-73d5-41e3-b08b-0ed884d639c1>.
90. Bohachev I., Kovtun S., Kuts Y., Sozonov S., Khaidurov V. (2023). Enhanced phase method of signal detection for ultrasonic magnetostriction

defectoscopy of power equipment. System Research in Energy, 2 (73), 72-82, <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.072>, (фахове видання, ISSN 2786-7102).

91. Созонов С.В. (2023). Спосіб виявлення сигналів магнітострикційної дефектоскопії при контролі елементів енергетичного обладнання. Збірник праць XIX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні”, 309-311 https://konfpbf.kpi.ua/new_imef_conf/wp-content/uploads/2025/01/Збірник-праць_EAIPП_2023_ПОЛІЯ_v2.pdf.

92. Bohachev I., Kozyr O., Sozonov S., Chekharovska M. Virtual Device for Analysis of Measurement Data by Magnetostrictive Method. Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, 1659, 235-246. https://doi.org/10.1007/978-3-032-06832-3_20 (Springer, Cham, ISBN 978-3-032-06832-3).

93. Bohachev I., Kozyr O., Sozonov S., Zaporozhets, A. (2025) Impulse Start Detection Algorithm to Automate Magnetostrictive Sensor Data Analysis for Quality Control Devices. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds) Systems, Decision and Control in Energy VII. Studies in Systems, Decision and Control, 595, 205-225. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90466-0_8 (Springer, Cham, ISBN 978-3-031-90466-0).

94. Богачев І.В., Козир О.В., Созонов С. В. (2024) Ультразвуковий контроль елементів енергетичного обладнання з використанням магнітострикційного ефекту. Збірка наукових праць “Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку” XX міжнародна науково-практична конференція, 159-162. <http://www.ceti-nasu.org.ua/upload/iblock/a50/a5008dee54a49d3f206562a657d51f69.pdf>.

95. Bohachev I., Kozyr O., Sozonov S. (2025) Reducing the influence of noise on the accuracy of ultrasonic pulse onset detection. System Research in Energy, 1 (81), 85-99. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.085>, (фахове видання, ISSN 2786-7102).

96. Созонов С.В., Богачев І.В., Декуша О.Л., Куц Ю.В. (2025) Вдосконалення методу аналізу даних вимірювань при магнітострикційному неруйнівному контролі об'єктів енергетики. XXVI Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» Тези конференції. Секція «Комплексні проблеми енергетичних систем на основі НВДЕ», 180-181. <https://www.ive.org.ua/language/uk/xxvi-mizhnarodna-naukovo-praktychna-konf/?lang=uk>.
97. Созонов С.В., Богачев І.В., Декуша О.Л., Куц Ю.В. (2025) Вдосконалення методу аналізу даних вимірювань при магнітострикційному неруйнівному контролі об'єктів енергетики. Міжнародний промисловий форум. Тези. <https://www.iec-expo.com.ua/pf-2025/umovipf-2025.html>.
98. Созонов С.В., Ковтун С.І., Богачев І.В., Декуша О.Л., Куц Ю.В. (2025) Розвиток методу аналізу даних ультразвукового контролю на основі магнітострикційних ефектів. Збірник тез доповідей за матеріалами III міжнародної науково-практичної конференції, 70-71. <https://drive.google.com/file/d/1mwRTbOw38WVHg2-GzVwlU7WVdzlDbklj/view>.
99. Kovtun S., Bohachev I., Dekusha O., Kuts Y., Kozyr O., Sozonov S. (2025) Experimental research of the magnetostrictive method of ultrasonic nondestructive testing. International Journal NDT Days (NDT Days 2025), 8(2), 70-76. <https://www.ndt.net/article/NDTDays2025/papers/JNDTD-v8-n2-a02.pdf>. ISSN: 2603-4018.
100. Бабак В.П., Богачев І.В., Декуша О.Л., Ковтун С.І., Куц Ю.В., Созонов С.В. (2025). Дослідження ультразвукового магнітострикційного методу ультразвукового контролю частина 1. застосування магнітострикційних ефектів в системах вимірювання та неруйнівного контролю (Огляд) Технічна діагностика та неруйнівний контроль, 3, 5-14. <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk/2025/03>. <https://doi.org/10.37434/tdnk2025.03.01>.

101. Niethammer, M.; Jacobs, L.J.; Qu, J.; Jarzynski, J. Time-frequency representations of Lamb waves. *J. Acoust. Soc. Am.* 2001, 109, 1841–1847. [CrossRef].
102. Su, Z.; Ye, L. Identification of Damage Using Lamb Waves: From Fundamentals to Applications, 1st ed.; Springer-Verlag: London, UK, 2009.
103. Grondel, S.; Assaad, J.; Delebarre, C.; Blanquet, P.; Moulin, E. The propagation of Lamb waves in multilayered plates: phase-velocity measurement. *Meas. Sci. Technol.* 1999, 10, 348–353. [CrossRef].
104. Chen, J.; Su, Z.; Cheng, L. Identification of corrosion damage in submerged structures using fundamental anti-symmetric Lamb waves. *Smart Mater. Struct.* 2010, 19, 015004. [CrossRef].
105. Benz, R.; Niethammer, M.; Hurlebaus, S.; Jacobs, L.J. Localization of notches with Lamb waves. *J. Acoust. Soc. Am.* 2003, 114, 677–685. [CrossRef] [PubMed].
106. Xu, K.; Ta, D.; Moilanen, P.; Wang, W. Mode separation of Lamb waves based on dispersion compensation method. *J. Acoust. Soc. Am.* 2012, 131, 2714–2722. [CrossRef].
107. Rguiti, M.; Grondel, S.; El youbi, F.; Courtois, C.; Lippert, M.; Leriche, A. Optimized piezoelectric sensor for a specific application: Detection of Lamb waves. *Sens. Actuators A Phys.* 2006, 126, 362–368. [CrossRef].
108. Zhang, R.; Wan, M.; Cao, W. Parameter Measurement of Thin Elastic Layers Using Low-Frequency Multi-Mode Ultrasonic Lamb Waves. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2001, 50, 1397–1403. [CrossRef].
109. Rajana, K.M.; Cho, Y.; Rose, J.L. Utility of Lamb Waves for Near Surface Crack Detection. In *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*; Thompson, D.O., Chimenti, D.E., Eds.; Springer: Boston, MA, USA, 1996; pp. 247–252.
110. Greve, D.W.; Zheng, P.; Oppenheim, I.J. Transition from Lamb waves to longitudinal waves in plates. *Smart Mater. Struct.* 2008, 17, 11. [CrossRef].
111. Harb, M.S.; Yuan, F.G. A rapid, fully non-contact, hybrid system for generating Lamb wave dispersion curves. *Ultrasonics* 2015, 61, 62–70. [CrossRef] [PubMed].

112. Castaings, M.; Cawley, P. The generation, propagation, and detection of Lamb waves in plates using air-coupled ultrasonic transducers. *J. Acoust. Soc. Am.* 1996, 100, 3070–3077. [CrossRef].
113. Ghosh, T.; Kundu, T.; Karpur, P. Efficient use of Lamb modes for detecting defects in large plates. *Ultrasonics* 1998, 36, 791–801. [CrossRef].
114. Zhao, M.; Zeng, L.; Lin, J.; Wu, W. Mode identification and extraction of broadband ultrasonic guided waves. *Meas. Sci. Technol.* 2014, 25, 115005. [CrossRef].
115. Genovés, V.; Gosálbez, J.; Carrión, A.; Miralles, R.; Payá, J. Optimized ultrasonic attenuation measures for non-homogeneous materials. *Ultrasonics* 2016, 65, 345–352. [CrossRef] [PubMed].
116. Jain, A.; Greve, D.W.; Oppenheim, I.J. A MEMS Ultrasonic Transducer for Monitoring of Steel Structures. In *Proceedings of the SPIE's 9th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, San Diego, CA, USA, July 2002.

ДОДАТОК А

Лістинг програми моделювання процесу генерування сигналів ММП та оцінювання їх спектру

```
%01.10.2025
% small aperture magnetostreictive sensor signal
close all hidden; clear all;clear
    %part 1 задання сигналу
    dt=1.5625e-8;
    fs=500000;
t=dt:dt:3./fs;% вектор часу
t1=dt:dt:2./fs;% вектор часу радіоімпульсу
t2=dt:dt:4./fs;
N=length(t);n=1:N;
y1=zeros(size(t)); yk=zeros(size(t));y4=zeros(size(t2));
y1(1:256)=sin(2.*pi.*fs.*t1);
    subplot(3,1,1)
        plot(t,y1,'LineWidth',1.5);grid on
        set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',12)
        title('Вхідний електричний сигнал');xlabel('Час (с)');ylabel('y1(t)')
for k=2:32
    yk=zeros(size(t));
    yk(k:(256+k-1))=sin(2.*pi.*fs.*t1);
    y1=y1+yk;
end
subplot(3,1,2)
    plot(t,y1/32,'LineWidth',1.5);grid on
    set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',12)
    title('Вихідний акустичний сигнал 1 котушки');xlabel('Час (с)');ylabel('y2(t)')
y2=zeros(size(t));
y2(64:(64+290))=-y1(1:291);
y3=(y1+y2)./32;
subplot(3,1,3)
    plot(t,y3,'LineWidth',1.5);grid on
    set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',12)
    title('Вихідний акустичний сигнал двох котушок');xlabel('Час (с)');ylabel('y3(t)')
    %part 2 пряме FFT
        figure%2
z1 = fft(y3);
a1 =abs(z1);
    % z2 = fft(y2);
    % a2 =abs(z2);
        %z3=fft(y3);
        %a3 =abs(z3);
subplot(2,1,1)
%plot(a1); grid
    stem(a1); grid
    set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',12),
    title('Модуль Фур'є - зображення');
    xlabel('Номер елемента вектора');
    ylabel('abs(F(y(t)))')
    % part 3 формування масиву частот
f = 0:fs/3:1/dt-fs/3;
subplot(2,1,2)
plot(f,a1); grid
set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',12),
title('Модуль Фур"є-зображення');
xlabel('Частота (Гц)');
```

```

ylabel('abs(F(X(t)))')
    % part 4 перестановка складових спектру
    figure%3
f1 = -0.5/dt : fs/3: 0.5/dt; % Перебудова вектора частот
v1 = fftshift(z1); % Перебудова вектора Фур'є-зображення
a1 =abs(v1)./N; % Відшування модуля
    subplot(2,1,1)
    stem(f1(185:201),a1(185:201),'LineWidth',1.5); grid on
set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',12),
title('Спектр Фур'є - зображення');
xlabel('Частота (Гц)'); ylabel('abs(F(X(t)))')
    subplot(2,1,2)
    %plot(f1(870:1130),a2(870:1130)); grid on
    %stem(f1(870:1130),a2(870:1130)); grid on % for dt=2e-08;
    %stem(f1(118:138),a2(118:138),'LineWidth',1.5); grid on
set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',12),
title('Спектр Фур'є - зображення');
xlabel('Частота (Гц)'); ylabel('abs(F(X(t)))')
    %part 5 сигнал ММП-приймача
    figure%4
    %y4=y3;
    for k=1:32
        yk2=zeros(size(t2));
        yk2(k:(384+k-1))=y3;
        y4=y4+yk2;
    end
    subplot(4,1,3)
    plot(t2,y4/32,'LineWidth',1.5);grid on
    set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',12)
    title('Вихідний електричний сигнал 1 котушки');xlabel('Час (с)');ylabel('y2(t)')
    y5=zeros(size(t2));
    y5(64:(64+394))=-y4(1:395);
    y6=(y4+y5)./32;
    subplot(4,1,4)
    plot(t2,y6,'LineWidth',1.5);grid on
    set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',12)
    title('Вихідний електричний сигнал двох котушок');xlabel('Час (с)');ylabel('y3(t)')
    subplot(4,1,1)
    y7=zeros(size(t2));
    y7(1:256)=sin(2.*pi.*fs.*t1);
    plot(t2,y7,'LineWidth',1.5);grid on
    subplot(4,1,2)
    y8=zeros(size(t2));
    y8(1:384)=y3;
    plot(t2,y8,'LineWidth',1.5);grid on
    figure%5
    subplot(3,1,1)
    plot(t2,y7,'LineWidth',1.5);grid on
    set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',12)
    title('Вхідний електричний сигнал');xlabel('Час (с)');ylabel('y1(t)')
    subplot(3,1,2)
    plot(t2,y8*0.001,'LineWidth',1.5);grid on
    set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',12)
    title('Вихідний акустичний сигнал ММП1');xlabel('Час (с)');ylabel('y3(t)')
    subplot(3,1,3)
    plot(t2,y6*0.000001,'LineWidth',1.5);grid on;hold on
    set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',12)
    title('Вихідний електричний сигнал ММП2');xlabel('Час (с)');ylabel('y3(t)')
    y6h=hilbert(y6);
    Ay=abs(y6h);
    plot(t2,Ay*0.000001,'-');

```

```

%%%%%%%%%%%% побудова спектру сигналу ММП2
%part 2   пряме FFT
            figure%
z6 = fft(y6);
a6 =abs(z6);
subplot(2,1,1)
stem(a1); grid
set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',12),
title('Модуль Фур'є - зображення');
xlabel('Номер елемента вектора');
ylabel('abs(F(y(t)))')
    % part 3-2 формування масиву частот
f6 = 0:fs/4:1/dt-fs/4;
subplot(2,1,2)
plot(f6,a6); grid
set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',12),
title('Модуль Фур"є-зображення');
xlabel('Частота (Гц)');
ylabel('abs(F(X(t)))')
    % part 4   перестановка складових спектру
            figure%
f61 = -0.5/dt : fs/4: 0.5/dt; % Перебудова вектора частот
v6 = fftshift(z6); % Перебудова вектора Фур'є-зображення
a6 =abs(v6)./length(t2); % Відшукування модуля
            subplot(2,1,1)
                %stem(f61(175:211),a6(175:211),'LineWidth',1.5); grid on
                stem(f61(250:265),a6(250:265),'LineWidth',1.5); grid on
set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',12),
title('Спектр Фур"є - зображення');
xlabel('Частота (Гц)'); ylabel('abs(F(X(t)))')
            subplot(2,1,2)
                %plot(f1(870:1130),a2(870:1130)); grid on
                %stem(f1(870:1130),a2(870:1130)); grid on % for dt=2e-08;
                %stem(f1(118:138),a2(118:138),'LineWidth',1.5); grid on
set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',12),
title('Спектр Фур"є - зображення');
xlabel('Частота (Гц)'); ylabel('abs(F(X(t)))')

```

ДОДАТОК Б

Лістинг програми генерування сигналів ММП та оцінювання їх інформаційних параметрів

```
%01.10.2025
% small aperture magnetostreictive sensor signal
% сигнали ММП з урахуванням розмірів котушки
close all hidden; clear all;clear
    %part 1 задання сигналу
    dt=1.5625e-8;
    fs=500000;
t=dt:dt:3.5./fs;% вектор часу
t1=dt:dt:2./fs;% вектор часу радіоімпульсу
t2=dt:dt:4./fs;
N=length(t);n=1:N;
y1=zeros(size(t)); yk=zeros(size(t));y4=zeros(size(t2));
y1(1:256)=sin(2.*pi.*fs.*t1);
    subplot(3,1,1)
        plot(t,y1,'LineWidth',1.5);grid on
        set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',11)
        title('Вхідний електричний сигнал');xlabel('Час (с)');ylabel('y1(t)')
for k=2:32
    yk=zeros(size(t));
    yk(k:(256+k-1))=sin(2.*pi.*fs.*t1);
    y1=y1+yk;
end
subplot(3,1,2)
    plot(t,y1/32,'LineWidth',1.5);grid on
    set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',11)
    title('Вихідний акустичний сигнал 1 котушки');xlabel('Час (с)');ylabel('y2(t)')
y2=zeros(size(t));
y2(64:(64+290))=-y1(1:291);
y3=(y1+y2)./32;
n=randn(size(t));sigma=0.1;
y3=y3+n.*sigma;
subplot(3,1,3)
    plot(t,y3,'LineWidth',1.5);grid on
    set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',11)
    title('Вихідний акустичний сигнал двох котушок');xlabel('Час (с)');ylabel('y3(t)')
    %part 2 дискретне перетворення Гільберта
    figure%2
y3h=hilbert(y3);
A=abs(y3h);
    subplot(3,1,1)
plot(t,y3,t,imag(y3h),t,A); grid
set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',11)
    title('Вхідний сигнал, його гільберт-образ та обвідна');xlabel('Час (с)');ylabel('Амплітуда')
fi=atan2(imag(y3h),real(y3h));
Fi=unwrap(fi)
    subplot(3,1,2)
plot(t,fi); grid
    set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',11)
    title('Нерозгорнута фаза сигналу');xlabel('Час (с)');ylabel('Фаза (рад)')
    subplot(3,1,3)
```

```

plot(t,Fi); grid
set(gca,'FontName','Arial Cyr','FontSize',11)
title('Розгорнута фаза сигналу');xlabel('Час (с)');ylabel('Фаза (рад)') clear;
close all; clc;

```

Лістинг програми визначення фазової швидкості розповсюдження хвиль Лемба

```

% input data
cL = 5900; cT = 3200;
h = 0.010/2;

f = linspace(minfreq, maxfreq, 30000);
cp = linspace(100, 6000, 10000);
[f, cp] = meshgrid(f, cp);

omega = 2*pi*f; k = omega./cp;
p = sqrt((omega/cL).^2 - k.^2);
q = sqrt((omega/cT).^2 - k.^2);

Fsym = Sym(k, p, q, h);
[i,j] = find(abs(Fsym) < eps);
length(i)
idx = sub2ind(size(Fsym), i, j);
x = f(idx)/1e6; y = cp(idx);

xlswrite('filename.xlsx',[x y],1);

plot(x,y,'.b'); hold on; grid on;
clear Fsym;

Fanti = ASym(k, p, q, h);
[i,j] = find(abs(Fanti) < eps);
length(i)
idx = sub2ind(size(Fanti), i, j);
x = f(idx)/1e6; y = cp(idx);
plot(x,y,'.r'); hold off;
xlswrite('filename.xlsx',[x y],2);

clear all;
end

function z = Sym(k, p, q, h)
z = tan(q*h)./tan(p*h) + 4*k.^2.*p.*q ./ (k.^2 - q.^2).^2;
end

function z = ASym(k, p, q, h)
z = tan(p*h)./tan(q*h) + 4*k.^2.*p.*q ./ (k.^2 - q.^2).^2;
end

```

Лістинг програми визначення фазової та групової швидкості розповсюдження антисиметричної хвилі Лемба

```

eps_val = 1e-4;
N = 10000;
minfreq = 100000;
maxfreq = 1e6;

cL = 5900; cT = 3200; h = 0.001/2;

f0 = linspace(minfreq, maxfreq, N);
cp0 = linspace(100, 6000, N);

```

```

[f, cp] = meshgrid(f0, cp0);

omega = 2*pi*f;
k_mesh = omega./cp;
p = sqrt((omega/cl).^2 - k_mesh.^2 + 0j);
q = sqrt((omega/cT).^2 - k_mesh.^2 + 0j);

Fanti = ASym(k_mesh, p, q, h);
[i, j] = find(abs(Fanti) < eps_val);

x_all = f(sub2ind(size(Fanti), i, j));
y_all = cp(sub2ind(size(Fanti), i, j));

[unique_f, ~, idx_f] = unique(x_all);
cp_A0_raw = accumarray(idx_f, y_all, [], @min);

cp_A0_med = medfilt1(cp_A0_raw, 5);

f_interp = unique_f(:);
cp_A0 = interp1(unique_f, cp_A0_med, f_interp, 'pchip');

df = diff(f_interp);
dcp = diff(cp_A0);
dcp_df_raw = dcp ./ df;

dcp_df = smooth(f_interp(1:end-1), dcp_df_raw, 0.15, 'lowess');

f_mod = f_interp(1:end-1);
cp_mod = cp_A0(1:end-1);

cg = cp_mod ./ (1 - (f_mod ./ cp_mod) .* dcp_df);

cg(cg < 0 | cg > 5000) = NaN;

figure('Color','w','Name',' A0');

subplot(2,1,1);
plot(f_interp/1e6, cp_A0, 'r', 'LineWidth', 2);
title('Фазова швидкість');
grid on; ylabel('c_p, м/с');
xlim([minfreq/1e6, maxfreq/1e6]);
subplot(2,1,2);
cg_plot = smooth(f_mod, cg, 0.1, 'r_lowess');
plot(f_mod/1e6, cg_plot, 'b', 'LineWidth', 2);
title('Групова швидкість');
grid on; xlabel('f, МГц'); ylabel('c_g, м/с');
xlim([minfreq/1e6, maxfreq/1e6]);
ylim([0 4000]);

T = table(f_interp/1e6, cp_A0, [cg_plot; NaN], ...
    'VariableNames', {'Freq_MHz', 'cp_A0_ms', 'cg_A0_ms_Alt'});
writetable(T, 'Lamb_A0_Alt_Method.xlsx');

fprintf('Файл: Lamb_A0_Alt_Method.xlsx\n');

function z = ASym(k, p, q, h)
    z = tan(p*h)./tan(q*h) + 4*k.^2.*p.*q ./ (k.^2 - q.^2).^2;
end
end

```

ДОДАТОК В

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор ТОВ
«НВФ ДІАГНОСТИЧНІ ПРИЛАДИ»Олександр ПАВЛІЙ
«...» 2026 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ІЗЕ НАН України,
академік НАН УкраїниВіталій БАБАК
«...» 2026 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, що підписалися нижче, начальник лабораторії неруйнівного контролю ТОВ «НВФ ДІАГНОСТИЧНІ ПРИЛАДИ» Сергій ГЛАБЕЦЬ та від Інституту загальної енергетики НАН України (ІЗЕ НАН України) – провідний науковий співробітник, д. т. н., ст. досл. Олег ДЕКУША та аспірант ІЗЕ НАН України Станіслав СОЗОНОВ склали цей акт про те, що результати роботи за відомчою тематикою з пифром «Моніторинг» впроваджені у ТОВ «НВФ ДІАГНОСТИЧНІ ПРИЛАДИ».

Найменування впровадженого результату	Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект
Програмне та алгоритмічне забезпечення оцінювання інформативних параметрів сигналів магнітострикційного контролю із застосуванням дискретного перетворення Гільберта з метою автоматизації прийняття рішень та підвищення достовірності ультразвукового неруйнівного контролю	Вдосконалення інформаційно-вимірювальної технології та алгоритмів опрацювання сигналів на основі дискретного перетворення Гільберта, що забезпечило надійне оцінювання амплітудно-часових параметрів в умовах деформації обвідної імпульсу, дозволило автоматизувати процес прийняття рішень та розширити функціональні можливості існуючих систем діагностики.

Начальник
лабораторії неруйнівного контролю
ТОВ «НВФ ДІАГНОСТИЧНІ ПРИЛАДИ»

Сергій ГЛАБЕЦЬ

Провідний науковий співробітник,
д. т. н., ст. досл.

Олег ДЕКУША

Аспірант

Станіслав СОЗОНОВ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан факультету робототехніки та
приладобудування
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

к.т.н., доцент

Марина ФІЛІПОВА

« 19 »

2026 року

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

в навчальному процесі матеріалів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня доктора філософії
Созонова Станіслава Вікторовича

В навчальному процесі кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю факультету робототехніки та приладобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при підготовці бакалаврів зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (освітня програма «Комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка») та в ході розроблення силабусу, конспекту лекцій та практичних робіт з дисципліни «Новітні системи та технології обробки сигналів» були використані такі матеріали дисертаційної роботи С. В. Созонова:

- метод оцінювання інформативних параметрів сигналів при проведенні ультразвукового неруйнівного контролю з використанням магнітострикційних перетворювачів на основі дискретного перетворення Гілберта;
- концепцію сучасних вимірювальних інструментів та вдосконалену технологію контролю для автоматизації опрацювання вимірювальної інформації та прийняття рішень у системах ультразвукового неруйнівного контролю

Завідувач кафедри автоматизації та систем
неруйнівного контролю,
д.т.н., доцент

Юрій КИРИЧУК

Директор навчально-наукового
інституту енергетики, автоматики і
енергозбереження Національного
університету біоресурсів і
природокористування України,
д-р техн. наук, проф.



Віктор КАПЛУН
«20» 01 2026 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальний процес
Навчально-наукового інституту енергетики, автоматики і енергозбереження
Національного університету біоресурсів і природокористування України

Даний акт складений про те, що матеріали дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії Созонова Станіслава Вікторовича, а саме алгоритм оцінювання параметрів сигналів на основі перетворення Гілберта та концепцію автоматизації ультразвукового неруйнівного контролю, що дозволило поглибити вивчення методів цифрового опрацювання вимірjuвальної інформації, були впровадженні в навчальний процес кафедри інженерії енергосистем ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України при розробці робочих програм і лекційного матеріалу з дисциплін: «Метрологія, технологічні вимірювання і прилади» за освітньою програмою «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» для здобувачів освітнього ступеню «Бакалавр», а також «Прикладні задачі енергозбереження» за освітньою програмою «Інженерія відновлювальних джерел енергії і енергоменеджмент» для здобувачів освітнього ступеню «Магістр» відповідно.

Завідувач кафедри інженерії
енергосистем ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження
канд. техн. наук, доцент



Євген АНТИПОВ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Виконавець
ТОВ "САХАРА"

Сергій ДАНИЛІВ



«28» 03 2026 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня доктора філософії
Созонова Станіслава Вікторовича

Ми, що підписалися нижче, виконавець ТОВ "САХАРА Сергій ДАНИЛІВ та від Інституту загальної енергетики НАН України (ІЗЕ НАН України) – провідний науковий співробітник, науковий керівник д.т.н., ст. досл. Олег ДЕКУША та аспірант ІЗЕ НАН України Станіслав СОЗОНОВ склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Станіслава СОЗОНОВА впроваджені у ТОВ "САХАРА.

Найменування впровадженого результату	Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект
Алгоритм проведення досліджень ультразвукового контролю з використанням малоапературних магнітострікційних перетворювачів	Впровадження алгоритму проведення досліджень з використанням неруйнівного ультразвукового контролю з використанням малоапературних магнітострікційних перетворювачів удосконалило проведення діагностики при визначенні цілісності та структурної однорідності в тонкостінних зразках та з'єднань.

Виконавець
ТОВ "САХАРА"

Максим ДРАНИК

Науковий керівник, д.т.н, ст. досл.

Олег ДЕКУША

Аспірант
Станіслав СОЗОНОВ

ДОДАТОК Г

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Бабак В.П., Богачев І.В., Декуша О.Л., Ковтун С.І., Куц Ю.В., Созонов С.В. (2025) Дослідження ультразвукового магнітострикційного методу ультразвукового контролю. Частина 1. Застосування магнітострикційних ефектів у системах вимірювання та неруйнівного контролю. Технічна діагностика та неруйнівний контроль № 3, (2025), с.5-14. <https://doi.org/10.37434/tdnk2025.03.01> **(фахове видання, категорія Б, ISSN 3041-2366)**
2. Bohachev I., Kozyr O., Sozonov S. Redusing the influence of noise on the fccuracy of ulyras0nic pulse onset detection. System Research in Energy, 1 (81) (2025) <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.085> **(фахове видання, категорія Б, ISSN 2786-7102)**
3. Bohachev, I., Kozyr, O., Sozonov, S., Zaporozhets, A. (2025). Impulse Start Detection Algorithm to Automate Magnetostrictive Sensor Data Analysis for Quality Control Devices. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds)/ In: Systems, Decision and Control in Energy VII. Studies in Systems, Decision and Control, vol 595. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90466-0_8 **(Scopus, ISSN: 21984182)**
4. Ihor, B., Kozyr, O., Stanislav, S., Maryna, C. (2025). Virtual Device for Analysis of Measurement Data by Magnetostrictive Method. In: Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1659. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-06832-3_20 **(Scopus, ISSN: 23673370)**
5. Бабак В.П., Богачев І.В., Ковтун С.І., Созонов С.В., Хайдуров В.В. Патент на винахід №129684, Україна, МПК (2022.01) G01H 11/04 (2006.01), G01H 5/00 (2006.01), G01N29/24 (2006.01), B06B1/08, G01N29/14 (2006.1) Малоапертурний магнітострикційний сенсор; заявл. 02.02.2023, опубл. 02.07.2025. Бюл. № 27/2025. **(Патент на винахід)**
6. Bohachev I., Kovtun S., Kuts Y., Sozonov S., Khaidurov V. (2023). Enhanced phase method of signal detection for ultrasonic magnetostriction defectoscopy of power equipment. System Research in Energy, 2 (73), 72-82, <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.072> , **(фахове видання, категорія Б, ISSN 2786-7102).**
7. Kovtun S., Bohachev I., Dekusha O., Kuts Y., Kozyr O., Sozonov S. (2025) Experimental research of the magnetostrictive method of ultrasonic nondestructive testing. International Journal NDT Days (NDT Days 2025), 8(2), 70-76. **(Закордонне фахове видання, ISSN: 2603-4018.)**

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Созонов С. В., Богачев І. В., Декуша О. Л., Куц Ю. В. Вдосконалення методу аналізу даних вимірювань примагнітострикційному неруйнівному контролю об'єктів енергетики. XXVI Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювальна енергетика та енергоефективність у XXI столітті», м.Київ, 23 травня 2025р.
9. Созонов С. В., Ковтун С. В., Богачев І. В., Декуша О. Л., Куц Ю. В. Розвиток методу аналізу даних ультразвукового контролю на основі магнітострикційних ефектів. III Міжнародна науково-практична конференція «Цифрові технології в енергетиці і автоматичі», м. Київ, 06 червня 2025р.
10. Созонов С. В., Ковтун С. В., Богачев І. В., Декуша О. Л., Куц Ю. В. Дослідження магнітострикційного методу ультразвукового контролю, Міжнародний промисловий форум, м. Київ, 28 травня 2025р.
11. Богачев І.В., Козир О.В., Созонов С. В. (2024) Ультразвуковий контроль елементів енергетичного обладнання з використанням магнітострикційного ефекту. Збірка наукових праць “Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку” XX міжнародна науково-практична конференція, 159-162. <http://www.ceti-nasu.org.ua/upload/iblock/a50/a5008dee54a49d3f206562a657d51f69.pdf>
12. Созонов С.В. (2023). Спосіб виявлення сигналів магнітострикційної дефектоскопії при контролі елементів енергетичного обладнання. Збірник праць XIX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні”, 309-311 https://konfpbf.kpi.ua/new_imef_conf/wp-content/uploads/2025/01/Збірник-праць_EAIP_2023_ПОЛЯ_v2.pdf