

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ

(повна назва інституту/факультету)

КОНСТРУЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ АПАРАТУРИ

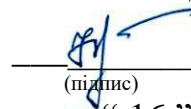
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК: 621.787.4

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

 О.М.Лисенко
(підпис) (ініціали, прізвище)
«16» грудня 2024 р

Магістерська дисертація

зі спеціальності 172 – Електронні комунікації та радіотехніка

(код і назва)

на тему: Безпроводна система моніторингу напружень та деформацій
мостових конструкцій

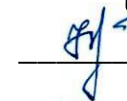
Виконав: студент II курсу, групи ДК-31мп

(шифр групи)

Кириєнко Михайло Олександрович

 (підпис)

Науковий керівник: д.т.н. проф. Лисенко О.М.

 (підпис)

Консультант _____

(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

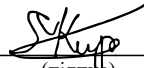
(підпис)

Рецензент: доцент кафедри АМЕС, доц., к.т.н. Попович П.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент 
(підпис)

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”

Інститут/факультет електроніки .
(повна назва)
Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури .
(повна назва)
Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо - професійною
програмою
Спеціальність 172 – Електронні комунікації та радіотехніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри



(підпис) Лисенко О.М.
(прізвище та ініціали)
«15» травня 2024 року

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію

студенту Кириєнку Михайлу Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Безпроводна система моніторингу напружень і деформацій мостових конструкцій
науковий керівник дисертації: Лисенко Олександр Миколайович д.т.н. проф.
(Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом по університету від «08» листопада 2024 року №5027-с
2. Термін подання студентом дисертації: 15 грудня 2024 року
3. Об'єкт дослідження: процес моніторингу деформацій і напружень мостових конструкцій, що зазнають динамічних і статичних навантажень під час експлуатації.
4. Предмет дослідження: метод ефекту Баркгаузена для моніторингу стану мостових конструкцій, структурно-функціональна організація безпроводної системи на його основі та технічні рішення її реалізації.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1. Аналіз існуючих методів моніторингу та обґрунтування вибору базового методу. 2. Особливості застосування методу ефекту Баркгаузена для моніторингу стану мостових конструкцій 3. Практична реалізація та випробування складових системи моніторингу на основі методу ефекту Баркгаузена. 4. Розроблення стартап-проєкту.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Презентація у форматі PowerPoint.

7. Орієнтовний перелік публікацій: 1 публікація

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання: 15 травня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз літературних джерел за темою дослідження	15.05.2024 – 14.06.2024	Вик.
2	Аналіз відомих методів неруйнівного контролю та рішень моніторингу напружень і деформацій	15.06.2024 – 14.07.2024	Вик.
3	Порівняльний аналіз сучасних методів моніторингу мостових конструкцій та обґрунтування вибору методу ефекту Баркгаузена	15.07.2024 – 14.08.2024	Вик.
4	Особливості застосування методу ефекту Баркгаузена для моніторингу стану мостових конструкцій	15.08.2024 – 14.09.2024	Вик.
5	Розроблення структурно-функціональної організації безпроводної системи моніторингу стану мостових конструкцій	15.09.2024 – 14.10.2024	Вик.
6	Практична реалізація та випробування складових системи моніторингу на основі методу ефекту Баркгаузена	15.10.2024 – 14.11.2024	Вик.
7	Розроблення концепції стартап-проекту для впровадження системи моніторингу	15.11.2024 – 30.11.2024	Вик.
8	Оформлення дисертації	31.11.2024 – 04.12.2024	Вик.

Студент



(підпис)

Кирієнко М.О.
(прізвище, ініціали)

Науковий керівник дисертації



(підпис)

Лисенко М.О.
(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація обсягом 94 сторінок включає 42 рисунків, 31 таблиць та містить 30 джерел літератури.

Актуальність. Моніторинг напружень та деформацій мостових конструкцій є ключовим елементом забезпечення їхньої безпеки та довговічності. Традиційні методи моніторингу мостових конструкцій, які обмежуються здебільшого візуальною перевіркою наявності деформацій неозброєним оком, мають значні недоліки: низьку точність, залежність від людського фактору та неможливість отримання даних у реальному часі.. Зазначене визначає актуальність та важливість теми дослідження, спрямованої на розробку інноваційних рішень для моніторингу деформацій і напружень мостових конструкцій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження проводилося відповідно до тематики наукових досліджень кафедри КЕОА ФЕЛ та пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки України «Інформаційні та комунікаційні технології».

Метою роботи є підвищення безпеки експлуатації мостових конструкцій та запобігання небезпечним ситуаціям шляхом обґрунтування та застосування методу ефекту Баркгаузена для моніторингу стану мостових конструкцій, розроблення структурно-функціональної організації безпроводної системи на його основі та створення технічних рішень її реалізації.

Для досягнення мети в роботі розв'язано наступні **завдання:**

- Проведено аналіз існуючих методів неруйнівного контролю феромагнетиків, визначено їх достоїнства і недоліки та обґрунтовано вибір в якості базового для дослідження методу ефекту Баркгаузена;
- Розглянуто особливості застосування методу ефекту Баркгаузена для моніторингу стану мостових конструкцій;

- Наведено результати практичної реалізації та випробування складових системи моніторингу на основі методу ефекту Баркгаузена;
- Розроблено стартап-проект для комерційної реалізації отриманих результатів роботи.

Об'єкт дослідження: процес моніторингу деформацій і напружень мостових конструкцій, які піддаються динамічним і статичним навантаженням у процесі експлуатації.

Предмет дослідження: метод ефекту Баркгаузена для моніторингу стану мостових конструкцій, структурно-функціональна організація безпроводної системи на його основі та технічні рішення її реалізації.

Методи дослідження. Неруйнівного контролю стану феромагнетиків, ефекту Баркгаузена, порівняльного аналізу, вимірювання та експериментальних досліджень.

Наукова новизна. Запропоновано нову структурно-функціональну організацію безпроводної системи моніторингу стану мостових конструкцій, відрізняльною особливістю якої є використання в якості первинного вимірювального перетворювача індуктивного сенсора на основі методу ефекту Баркгаузена, що дозволяє при її реалізації підвищити безпеку експлуатації мостових конструкцій, запобігати аварійним ситуаціям та забезпечувати можливість вчасного прийняття рішень щодо проведення ремонтних чи профілактичних робіт.

Практичне значення отриманих результатів визначається розробленими технічними рішеннями реалізації складових безпроводної системи моніторингу стану мостових конструкцій, створеним макетом індуктивного сенсора на основі метода ефекту Баркгаузена та розробленими рекомендаціями по застосуванню системи.

Апробація результатів. Результати дисертаційних досліджень апробовано на XV науково-технічній конференції молодих вчених

«Електроніка – 2024», м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, 28-31 травня 2024р.

Публікації. За матеріалами дослідження опубліковано одну статтю (див. Додаток А):

- Кириєнко М.О. Пристрій моніторингу деформацій та напружень мостових конструкцій на основі методу Баркгаузена // ЗБІРНИК ПРАЦЬ XV Науково-технічної конференції молодих вчених «Електроніка-2024». С. 49 – 51.

Ключові слова: метод ефекту Баркгаузена, моніторинг, мости, конструкція, деформація, індуктивний сенсор, безпроводна система.

ABSTRACT

The 94-page master's thesis includes 42 figures, 31 tables and contains 30 sources of literature.

Relevance. Monitoring of stresses and strains of bridge structures is a key element in ensuring their safety and durability. Traditional methods of monitoring bridge structures, which are limited mostly to visual inspection of the presence of deformations with the naked eye, have significant drawbacks: low accuracy, dependence on the human factor and the inability to obtain data in real time. This determines the relevance and importance of the research topic aimed at developing innovative solutions for monitoring deformations and stresses of bridge structures.

The connection of the work with scientific programs, plans, topics. The dissertation research was conducted in accordance with the subject of scientific research of the Department of KEOA FEL and the priority direction of development of science and technology of Ukraine "Information and communication technologies".

The purpose of the work is to increase the safety of operation of bridge structures and prevent dangerous situations by substantiating and applying the Barkhausen effect method for monitoring the condition of bridge structures, developing a structural and functional organization of a wireless system based on it and creating technical solutions for its implementation.

To achieve the goal, the following tasks were solved in the work:

- An analysis of existing methods of non-destructive testing of ferromagnets was carried out, their advantages and disadvantages were determined, and the choice of the Barkhausen effect method as the basic method for research was justified;
- The features of the application of the Barkhausen effect method for monitoring the condition of bridge structures were considered;
- The results of the practical implementation and testing of the components of the monitoring system based on the Barkhausen effect method were presented;
- A startup project was developed for the commercial implementation of the obtained results.

Object of research: the process of monitoring deformations and stresses of bridge structures that are subjected to dynamic and static loads during operation.

Subject of research: the Barkhausen effect method for monitoring the condition of bridge structures, the structural and functional organization of a wireless system based on it and technical solutions for its implementation.

Research methods. Non-destructive testing of the condition of ferromagnets, the Barkhausen effect, comparative analysis, measurement and experimental research.

Scientific novelty. A new structural and functional organization of a wireless system for monitoring the condition of bridge structures is proposed, the distinctive feature of which is the use of an inductive sensor based on the Barkhausen effect method as the primary measuring transducer, which allows its implementation to increase the safety of bridge structures, prevent emergency situations and ensure the possibility of timely decision-making regarding repair or preventive work.

The practical significance of the results obtained is determined by the developed technical solutions for implementing the components of the wireless system for monitoring the condition of bridge structures, the created model of an inductive sensor based on the Barkhausen effect method and the developed recommendations for the use of the system.

Testing of results. The results of the dissertation research were tested at the XV scientific and technical conference of young scientists "Electronics - 2024", Kyiv, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, FEL, May 28-31, 2024.

Publications. Based on the research materials, one article was published (see Appendix A):

- Kyriienko M.O. Device for monitoring deformations and stresses of bridge structures based on the Barkhausen method // PROCEEDINGS OF THE 15TH SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE OF YOUNG SCIENTISTS "ELECTRONICS-2024". Pp. 49 – 51.

Keywords: Barkhausen effect method, monitoring, bridges, structure, deformation, inductive sensor, wireless system.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	3
ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ФЕРОМАГНЕТИКІВ	7
1.1 Загальна класифікація найбільш поширених методів неруйнівного контролю	7
1.2 Аналіз методів виявлення поверхневих дефектів	8
1.2.1 Капілярний метод контролю (КМК)	8
1.2.2 Магнітопоршковий метод	9
1.3 Аналіз методів виявлення приповерхневих дефектів	12
1.3.1 Вихрострумний метод	12
1.3.2 Метод ефекту Баркгаузена	16
1.4 Аналіз методів виявлення об'ємних дефектів	18
1.4.1 Акустичні методи.....	18
1.4.1.1 Метод ультразвукової обробки з фазованою решіткою	20
1.4.1.2 Дифракційно-часовий метод.....	21
1.4.2 Радіаційний метод.....	24
Висновки до розділу 1	27
РОЗДІЛ 2. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЕФЕКТУ БАРКГАУЗЕНА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ	29
2.1 Фізична основа ефекту Баркгаузена	29
2.2 Метод Баркгаузена як інструмент вимірювання напружень і деформацій.....	31
2.3 Фактори впливу на МEB.....	34

2.4 Аналіз конструкторських рішень реалізації методу ефекту Баркгаузена	37
2.5 Розроблення конструкції індуктивного сенсору на основі методу ефекту Баркгаузена	43
Висновки за розділу 2	45
РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ЕФЕКТУ БАРКГАУЗЕНА.....	46
3.1 Розробка структурно-функціональної організації безпроводної системи моніторингу.....	46
3.1.1 Генератори модульованого сигналу	48
3.1.2 Підсилювач потужності.....	49
3.1.3 Мікроконтролер	51
3.1.4 Індуктивний сенсор.....	56
3.1.5 Модуль реального часу	56
3.1.6. Принцип роботи безпроводної системи моніторингу.....	57
3.2 Обґрунтування вибору елементної бази для структурних складових системи	59
3.3 Макетування окремих вузлів системи і симуляція їх роботи	63
3.4 Використання системи на мостовій конструкції	66
Висновки до розділу 3	70
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ	71
Висновки до розділу 4	84
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	86
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	88
Додаток А Копія публікації.....	92

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

НК – неруйнівний контроль

КМК – капілярний метод контролю

МПМ – магнітопорошковий метод

УЗК – ультразвуковий контроль

УОЗФ - ультразвукова обробка з фазованою решіткою

ДЧМ – дифракційно-часовий метод

МЕБ – метод ефекту Баркгаузена

ЕРС – електрорушійна сила

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ВСТУП

Актуальність. Моніторинг напружень та деформацій мостових конструкцій є ключовим елементом забезпечення їхньої безпеки та довговічності. Традиційні методи моніторингу мостових конструкцій, які обмежуються здебільшого візуальною перевіркою наявності деформацій неозброєним оком, мають значні недоліки: низьку точність, залежність від людського фактору та неможливість отримання даних у реальному часі. Впровадження безпроводних технологій дозволяє створювати економічні, адаптивні та функціональні системи моніторингу, які забезпечують достовірний контроль стану конструкцій. Однак, це вимагає вирішення наукових і технічних задач по збору, передачі та аналізу даних моніторингу із використанням сучасних методів неруйнівного контролю. Така трансформація визначає актуальність та важливість теми дослідження, спрямованої на розробку інноваційних рішень для моніторингу деформацій і напружень мостових конструкцій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження проводилося відповідно до тематики наукових досліджень кафедри КЕОА ФЕЛ та пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки України «Інформаційні та комунікаційні технології».

Метою роботи є підвищення безпеки експлуатації мостових конструкцій та запобігання небезпечним ситуаціям шляхом обґрунтування та застосування методу ефекту Баркгаузена для моніторингу стану мостових конструкцій, розроблення структурно-функціональної організації безпроводної системи на його основі та створення технічних рішень її реалізації.

Для досягнення мети в роботі розв'язано наступні **завдання:**

- Проведено аналіз існуючих методів неруйнівного контролю ферромагнетиків, визначено їх достоїнства і недоліки та обґрунтовано вибір в якості базового для дослідження методу ефекту Баркгаузена;

- Розглянуто особливості застосування методу ефекту Баркгаузена для моніторингу стану мостових конструкцій;
- Наведено результати практичної реалізації та випробування складових системи моніторингу на основі методу ефекту Баркгаузена;
- Розроблено стартап-проект для комерційної реалізації отриманих результатів роботи.

Об'єкт дослідження: процес моніторингу деформацій і напружень мостових конструкцій, які піддаються динамічним і статичним навантаженням у процесі експлуатації.

Предмет дослідження: метод ефекту Баркгаузена для моніторингу стану мостових конструкцій, структурно-функціональна організація безпроводної системи на його основі та технічні рішення її реалізації.

Методи дослідження. Неруйнівного контролю стану феромагнетиків, ефекту Баркгаузена, порівняльного аналізу, вимірювання та експериментальних досліджень.

Наукова новизна. Запропоновано нову структурно-функціональну організацію безпроводної системи моніторингу стану мостових конструкцій, відрізняльною особливістю якої є використання в якості первинного вимірювального перетворювача індуктивного сенсора на основі методу ефекту Баркгаузена, що дозволяє при її реалізації підвищити безпеку експлуатації мостових конструкцій, запобігати аварійним ситуаціям та забезпечувати можливість вчасного прийняття рішень щодо проведення ремонтних чи профілактичних робіт.

Практичне значення отриманих результатів визначається розробленими технічними рішеннями реалізації складових безпроводної системи моніторингу стану мостових конструкцій, створеним макетом індуктивного сенсора на основі метода ефекту Баркгаузена та розробленими рекомендаціями по застосуванню системи.

Апробація результатів. Результати дисертаційних досліджень апробовано на XV науково-технічній конференції молодих вчених «Електроніка – 2024», м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, 28-31 травня 2024р.

Публікації. За матеріалами дослідження опубліковано одну статтю (див. Додаток А):

- Кирієнко М.О. Пристрій моніторингу деформацій та напружень мостових конструкцій на основі методу Баркгаузена // ЗБІРНИК ПРАЦЬ XV Науково-технічної конференції молодих вчених «Електроніка-2024». С. 46 – 49.

Структура дисертаційної роботи містить вступ, 4 розділи, загальний висновок, перелік використаної літератури та додатки:

- Додаток А. Копія статті у науковому виданні.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ФЕРОМАГНЕТИКІВ

1.1 Загальна класифікація найбільш поширених методів неруйнівного контролю

Для більшої зручності впорядкуємо методи контролю відповідно до певної класифікації (рис. 1), оскільки методи відрізняються між собою за тим, в яких шарах матеріалу знаходиться можливий дефект та яка глибина проникнення:

- Поверхневі методи – дефекти розташовані на поверхні матеріалу, глибина знаходження можливого дефекту менше 0,5 мм;
- Приповерхневі методи – дефекти розташовані під поверхнею контрольованого виробу на невеликій глибині від 0,5 мм до 5 мм;
- Об'ємні методи – дефекти розташовані всередині матеріалу на глибині понад 5 мм.

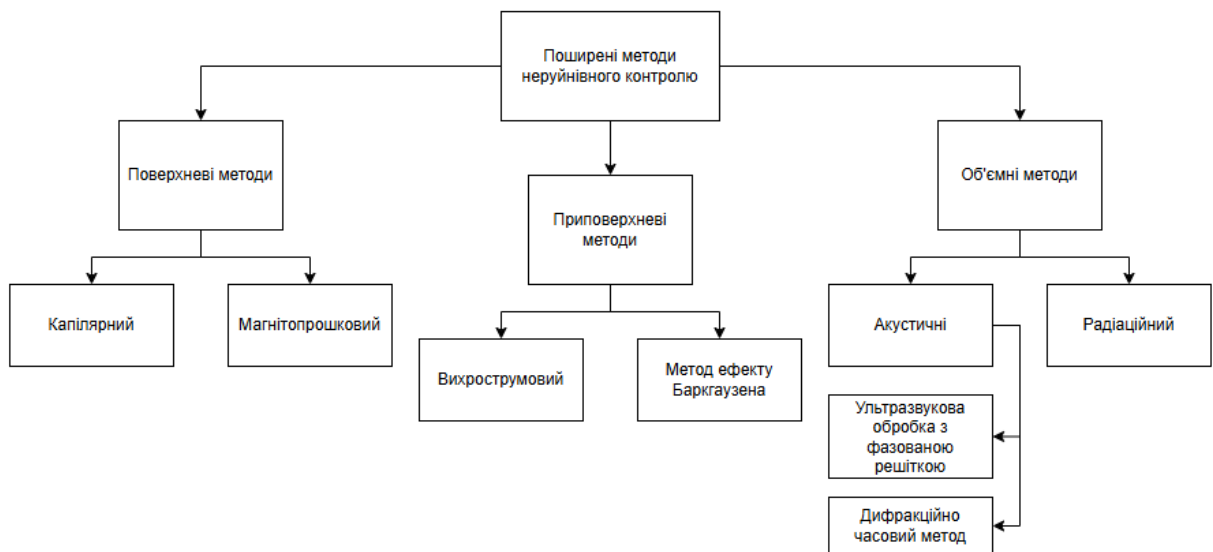


Рисунок 1 – Класифікація методів неруйнівного контролю (НК)

Усі наведені вище на рис. 1 методи широко застосовуються в сучасному неруйнівному контролі, взаємно компенсуючи свої недоліки. Для виявлення поверхневих дефектів підходять усі методи, хоча в деяких випадках більш ефективними є капілярний та магнітопорошковий. Приповерхневі дефекти

ефективно виявляються за допомогою ультразвукових, вихрострумового та магнітопорошкового методів, а для внутрішніх дефектів доцільно використовувати ультразвуковий та радіаційний методи.

Зупинимося нижче детальніше на розгляді особливостей кожного із них.

1.2 Аналіз методів виявлення поверхневих дефектів

1.2.1 Капілярний метод контролю (КМК)

КМК є одним із найпоширеніших неруйнівних методів для виявлення приповерхневих дефектів завдяки його простоті та низькій вартості. Він ефективно використовується для ідентифікації тріщин, пор, непроварів та інших дефектів, що можуть утворюватися на поверхні виробів під час їх експлуатації або виготовлення [1, 2]. Метод базується на здатності спеціальної рідини - пенетранту проникати в дефекти завдяки капілярному ефекту.

Процедура контролю згідно цього методу складається з наступних етапів.

Рідкий пенетрант наноситься на попередньо зачищену поверхню контрольованого об'єкта, заповнюючи будь-які наявні дефекти (рис. 2). Після

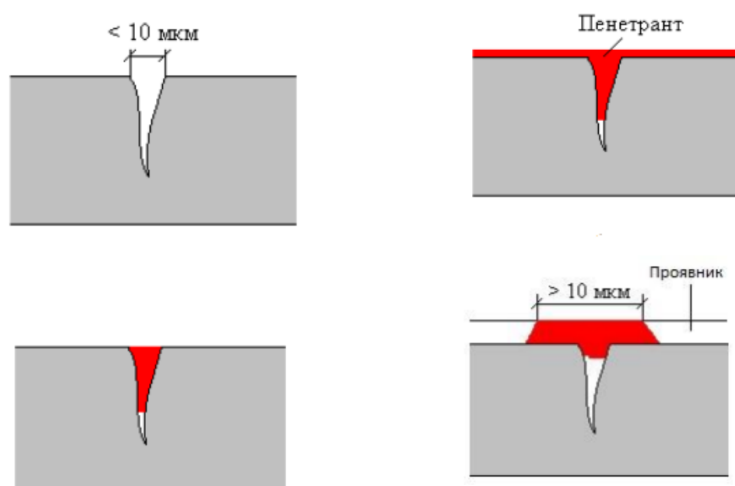


Рисунок 2 – Пошук поверхневих дефектів в металі капілярним методом [4]

необхідного часу витримки зайву рідину з поверхні об'єкта видаляють, залишаючи пенетрант лише в тріщинах. Потім на поверхню наносять проявник, який сприяє виведенню пенетранту з тріщин, утворюючи індикації

дефектів, видимі для подальшої оцінки. КМК є ефективний для контролю металевих матеріалів, однак має обмеження: його не можна застосовувати для пористих матеріалів, оскільки пенетрант може проникнути всередину матеріалу, ускладнюючи виявлення дефекту, а також не придатний для виявлення внутрішніх порушень структури.

Глибина виявлення дефекту за допомогою цього методу становить від 10 мкм до 1000 мкм. Чутливість КМК залежить від ширини дефекту: максимальна межа чутливості відповідає найбільшій ширині дефекту, при якій пенетрант повністю витікає, утворюючи розмиту індикацію. Мінімальна межа чутливості визначається розміром дефекту настільки малим, що пенетранту в ньому не вистачає для утворення видимого сигналу [3].

Коротко переваги та недоліки КМК наведено нижче у табл. 1.

Таблиця 1 - Переваги та недоліки КМК [1]

<i>Переваги</i>	<i>Недоліки</i>
Можливість контролю виробів різних форм та розмірів	Необхідна ретельно очищена поверхня
Простота методики контролю	Не придатний для виявлення об'ємних дефектів
Візуальна чіткість індикації	Не придатний для пористих матеріалів
Чутливість до дрібних дефектів	Навколишнє середовище сильно впливає на властивості

1.2.2 Магнітопоршковий метод

МПК базується на виявленні магнітних полів розсіювання, які утворюються над дефектами за рахунок феромагнітних частинок. У бездефектних ділянках виробу магнітний потік проходить без змін, тоді як на ділянках з дефектами, що мають знижену магнітну проникність, частина магнітних ліній виходить назовні, створюючи локальне магнітне поле над дефектом [1, 2]. Завдяки залишковій індукції це поле зберігається навіть після зняття зовнішнього магнітного поля. Для виявлення дефектів на намагнічену

поверхню наносяться феромагнітні частинки, які концентруються поблизу магнітного поля розсіювання, утворюючи ланцюжки, що дозволяє візуально ідентифікувати дефекти [1, 2, 4].

Існують дві методики нанесення феромагнітного порошку:

- «Суха» методика: використовується високодисперсний порошок розміром (0,1–10) мкм, що розпилюється для виявлення підповерхневих дефектів і дефектів під немагнітним покриттям товщиною до 200 мкм.
- «Мокра» методика: поверхню виробу покривають суспензією порошку або занурюють у ванну з нею.

Сухі частинки різних розмірів і форм оптимізують чутливість до дрібних дефектів і підходять для візуальної перевірки без вітру. Вологі частинки забезпечують кращу рухливість і рівномірне нанесення, що підвищує чутливість, а також менше прилипають до забруднень. Водяні носії вологих частинок пропонують кращий захист від корозії, тоді як сухі частинки ефективні в контрольованих умовах [2].

Оскільки магнітне поле над дефектом не однорідне, то на магнітні частинки, що попали в це поле, діє сила, яка тягне частинки у місце найбільшої концентрації магнітних ліній – дефекту. У результаті над дефектом відбувається накопичення частинок у вигляді смужок. Загалом, МПМ непогано себе проявляє для виявлення дефектів на глибині від 1 мм до 2 мм.

Переваги цього методу подібні до переваг капілярного методу. МПМ простий у використанні, що дозволяє його застосування не лише в лабораторних умовах. Він має високу чутливість до дрібних дефектів таких як тріщини та пори і забезпечує швидке отримання результатів, що робить його ефективним для оперативного контролю якості.

Однак, до його недоліків належить необхідність підготовки поверхні перед проведенням МПМ: вона повинна бути очищена від бруду, фарби, олії та інших забруднень на 2 мм. Якщо частинки прилипають до забруднених або нерівних поверхонь, це може призвести до помилкових результатів і ускладнити інтерпретацію даних [3]. Крім того, після аналізу матеріал потрібно розмагнітити, що вимагає додаткових зусиль і часу.

Незважаючи на ці недоліки, МПМ залишається популярним і ефективним вибором для виявлення дефектів у багатьох галузях промисловості завдяки своїй простоті, швидкості та чутливості, а також легкості у автоматизації процесу, що виливається у розвиток технічних рішень на основі цього методу.

Прикладами таких технічних рішень є продукти компанії MagnaFlux, яка пропонує прилади для намагнічування матеріалів з метою виявлення дефектів, а також для розмагнічування виробів перед їх подальшим використанням [6].

Намагнічувач Y-7 Yoke (рис. 3) – це електромагнітне ярмо, яке працює як на змінному, так і постійному струмі і призначено для виявлення поверхневих та підповерхневих індикацій порушень структури матеріалу за рахунок намагнічування поверхні об'єкту. Завдяки своїй конструкції, а саме шарнірним ніжкам і їх налаштованому розмаху, прилад підходить для будь-якої форми деталі.



Рисунок 3 – Зовнішній вигляд намагнічувача Y-7 Yoke [6]

Характеристики:

- Вага - 3,6 кг.
- Розмах ніжок - 5,1 – 30 см.
- Довжина кабелю - 3,7 м.
- Живлення – 115 В - 60 Гц: 6.0 А, 220/230В - 50/60 Гц: 2.7 А

Такий прилад добре підходить для інспекції складних конструкцій таких як мости (рис. 4), оскільки його конструкція дозволяє ефективно перевіряти поверхні легкодоступних частин. Завдяки простоті методу він не вимагає високого рівня професійної підготовки від спеціаліста, що робить його зручним у використанні [6].



Рисунок 4 – Контроль стану мостових конструкцій методом МПМ [2]

1.3 Аналіз методів виявлення приповерхневих дефектів

1.3.1 Вихрострумний метод

Вихрострумний метод – це метод неруйнівного електромагнітного контролю, який застосовує активовані датчики з вихровими котушками, встановленими поруч [1, 3]. Коли датчик розміщують на поверхні, що тестується, навколо нього створюється змінне магнітне поле, яке індукує вихрові струми в матеріалі об'єкта. Ці струми циркулюють у протилежному напрямку до струму

в котушці. Наявність тріщин чи інших дефектів змінює амплітуду та фазу цих вихрових струмів, що вказує на можливі недоліки матеріалу.

Спочатку метод використовувався у сфері аерокосмічної та нафтохімічної промисловості для перевірки немагнітних труб, прутків та інших циліндричних об'єктів, а зараз також застосовується для оцінки сталевих компонентів у будівництві, наприклад, у мостах [2]. У порівнянні з МПМ і КМК вихрострумівий підхід є більш швидким, адже потребує мінімальної підготовки поверхні, що робить його особливо зручним для багатозонного огляду.

Розподіл вихрових струмів залежить від джерела поля, геометричних параметрів об'єкта, а також відстані між котушкою і поверхнею тестованого матеріалу (рис. 5). Серед основних переваг методу – можливість здійснювати контроль без прямого контакту з об'єктом, зберігаючи високу точність на невеликій відстані. Зміни в електропровідності, магнітній проникності, а також наявність дефектів впливають на вихрові струми і призводять до змін в амплітуді та фазі, що можна зафіксувати шляхом вимірювання імпедансу котушки.

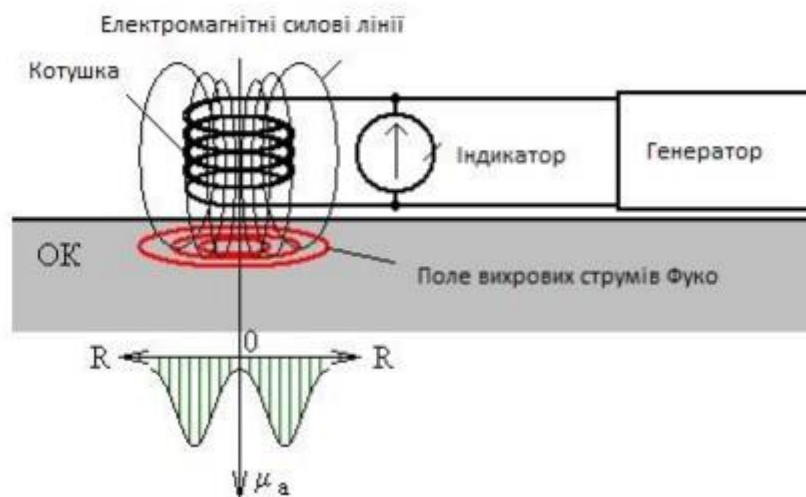


Рисунок 5 – Схема принципу дії з накладним вихрострумівим перетворювачем [1]

Якщо коротко описувати переваги цього методу, то можна виділити наступне:

- Відсутність необхідності підготовки поверхні.
- Виявлення прихованих дефектів та оцінка їх розміру на глибині до 2 мм.
- Є можливість використання, незважаючи на температурні або підводні чинники.

До недоліків можна віднести [3]:

- Складність інтерпретації сигналів вимагає кваліфікованого персоналу.
- Чутливий до електромагнітного шуму, через що потребує екранування.

Останні досягнення у використанні цього методу призвели до створення вдосконалених конструкцій котушок та схем мультиплексування для точнішого виявлення дефектів. Основною інновацією тангенціального вихрострумовевого методу є підвищена чутливість до поверхневих тріщин завдяки тангенціальному розташуванню котушок. Це розміщення створює вихрові струми, що проходять перпендикулярно до напрямку сканування, огинаючи дефект або проходячи під ним. Глибину дефекту можна визначити за щільністю вихрового струму: чим глибший дефект, тим нижча щільність струму на поверхні [5].

Прикладом сучасного технічного рішення реалізації цього методу є прилад Reddy (рис. 6) від компанії Eddyfi Technologies [7].



Рисунок 6 – Зовнішній вигляд приладу вихрострумовевого контролю Reddy [7]

Цей прилад представляє технологічний розвиток вихрострумового методу, розширюючи його переваги. Завдяки адаптивним зондам, які підлаштовуються під кривизну та складну геометрію виробу, прилад може перевіряти більші площі поверхні. Прилад здатний зберігати до 100 ГБ даних та відображати результати сканування на екрані для користувача. Також передбачена можливість передачі даних по мережі [7].

Основні параметри:

Живлення: 100-240 В, 50-60 Гц.

Пам'ять: SSD, 100 ГБ

Підключення: Gigabit Ethernet, Wi-Fi, Dual Mode Bluetooth

Зонди SHARK

Ці зонди здатні виявляти дефекти, вимірювати їхню довжину та визначати їх глибину до 7 мм. Маючи різні форми ці зонди надають змогу аналізу до більш складних ділянок виробів та матеріалу [7].

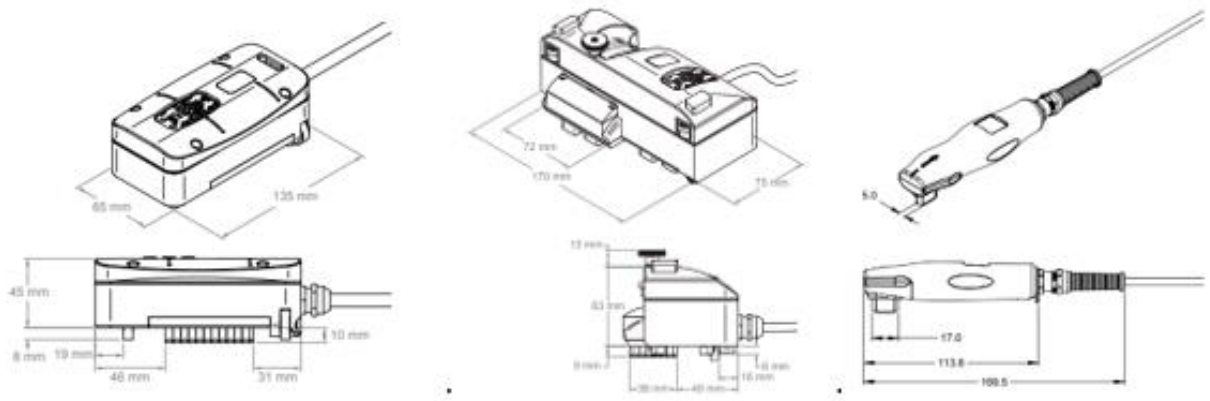


Рисунок 7 – Зонди SHARK різних моделей [7]

Таблиця 2 - Технічні характеристики [7]

Показники	Значення
Діапазон виявлених дефектів (довжина×глибина)	2 × 0,5 мм

<i>Показники</i>	<i>Значення</i>
Максимальна вимірювана глибина	7 мм
Точність визначення розміру дефекту	± 2 мм
Швидкість сканування	До 200 мм/с
Допуск до відриву	До 3 мм



Рисунок 8 – Використання приладу REDDY для виявлення дефектів [7].

1.3.2 Метод ефекту Баркгаузена

Феромагнітні матеріали складаються з магнітних доменів, які розділені доменними стінками. У стані без зовнішнього магнітного поля домени орієнтовані хаотично, тому матеріал не має намагніченості. МЕБ ґрунтується на стрибкоподібних змінах намагніченості феромагнітних матеріалів під дією зовнішнього магнітного поля. При зміні поля відбувається переміщення доменних стінок, що викликає переривчасті зміни магнітного потоку.

Коли прикладається магнітне поле, домени починають орієнтуватися в його напрямку і у результаті їх переміщення виникають «стрибки» Баркгаузена. Чутливість методу визначається магнітопружною взаємодією, яка впливає на вибір напрямку намагнічування. Стискаючі напруги зменшують інтенсивність та амплітуду шуму Баркгаузена, тоді як розтягуючі

– збільшують. Крім того, мікроструктура матеріалу впливає на форму та інтенсивність вихідного сигналу: магнітотверді матеріали мають ширшу форму сигналу, тоді як магнітом'які - більш вузьку [8]. Таким чином, вимірювання шуму Баркгаузена дозволяє аналізувати стан феромагнітних матеріалів, визначати механічні напруги та оцінювати мікроструктурний їх стан.

У джерелі [9] наведено конструкцію індуктивного сенсора для вимірювання напружено-деформованого стану, що дозволяє здійснювати контроль деформацій та напружень (рис. 9). Цей сенсор складається з двох взаємно перпендикулярних магнітопружних П-подібних осердь, на які намотані котушки індуктивності з малою та великою індуктивністю.

Принцип дії сенсора полягає в наступному. Котушка з меншою індуктивністю створює намагніченість матеріалу і працює як випромінювач електромагнітної хвилі, а котушка з більшою індуктивністю функціонує як приймач, зчитуючи зміну індуктивності, пропорційну прикладеній механічній нарузі [9].

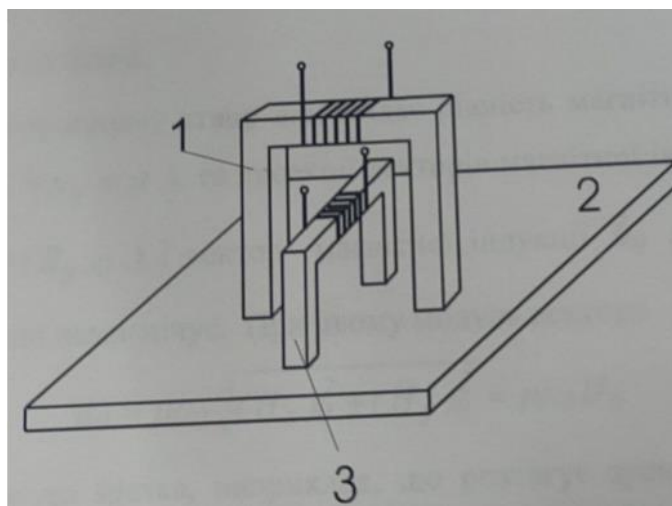


Рисунок 9 – Індуктивний сенсор (1, 3 – магнітопружні осердя, 2 – феромагнітна поверхня)

Глибина проникнення такого сенсора вимірюється за наступною формулою:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot \sigma \cdot a \cdot \mu_0 \cdot \mu}} \quad (1.3.2.1)$$

де σ – електропровідність матеріалу, f – частота сигналу, що подається на сенсор, μ_0 – магнітна константа, μ – відносна магнітна проникність.

Зниження частоти сигналу дозволяє збільшити глибину проникнення, що робить МЕБ більш привабливим порівняно з капілярним та магнітопорошковим, адже він здатний виявляти дефекти на більшій глибині в матеріалі, однак, порівняно з акустичним та радіаційним методами, цей метод не підходить для виявлення дефектів на значній глибині. Окрім того, ефективність такої конструкції може бути обмежене через зовнішні фактори, такі як температура. Швидка індикація результатів підвищує ефективність процесу, а відносно невисока вартість робить його економічно вигіднішим у порівнянні з акустичними та радіаційними методами.

Окрім цього, метод є зручним для моніторингу стану компонентів в реальному часі, що дозволяє оперативно оцінювати їхню якість та запобігати можливим аваріям.

Але головною особливістю цього методу і головною причиною того, що цей метод був вибраний для подальшого аналізу є те, що на відміну від усіх описаних вище методів, він дає змогу визначати стан матеріалу об'єкту, прогнозуючи можливі критичний стан матеріалу або виробу, де можуть виникати дефекти, порушення структури тощо. У той час як інші методи стикаються з проблемою та її пошуком, МЕБ надає можливість знати причину цих проблем.

1.4 Аналіз методів виявлення об'ємних дефектів

1.4.1 Акустичні методи

Метод ультразвукового контролю використовує звукові хвилі ультрависокої частоти для виявлення дефектів у матеріалах [4]. У процесі

перевірки техніки розміщують ультразвуковий перетворювач (або зонд) на поверхні деталі, зазвичай, з шаром рідини або гелю, відомим як зв'язковий для полегшення передачі звукової хвилі в матеріал.

Перетворювач перетворює електричні імпульси в звукові хвилі, а потім зворотний звук повертається назад до перетворювача, де він знову перетворюється в електричні імпульси для візуального відображення на екрані. Коли звукові хвилі стикаються з відбивачем - матеріалом з різною щільністю та акустичною швидкістю - вони відбиваються назад до перетворювача (рис. 10). Ультразвуковий контроль, зазвичай, використовує частоти в діапазоні від 0,1 МГц до 15 МГц [1, 3].

Цей метод широко застосовується для вимірювання корозії або зносу виробів, а також для оцінки цілісності стінок конструкцій і зварних швів протягом певного часу. Акустичні методи дозволяють виявляти як поверхневі, так і внутрішні дефекти в заготовках та виробах, такі як порушення суцільності, неоднорідності структури, зони корозії, дефекти паяння та зварювання.

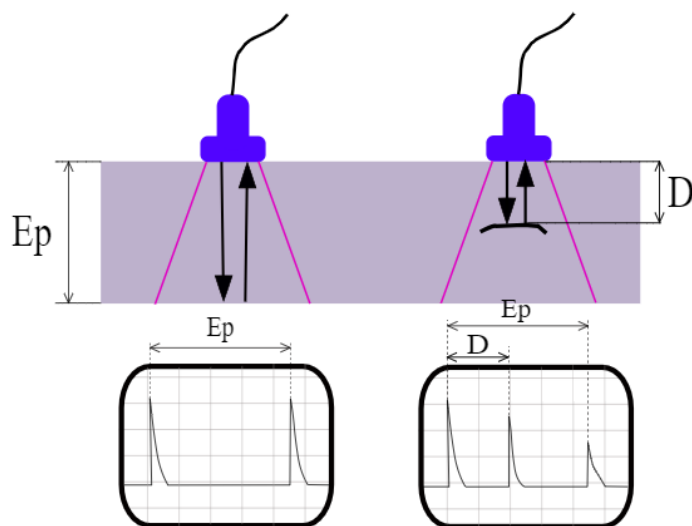


Рисунок 10 – Принцип методу ультразвукового контролю [1]

Використовуючи різні типи перетворювачів, фахівці з НК можуть створювати ультразвукові хвилі, які поширюються через матеріали в різних

режимах, кожен з яких має унікальні характеристики та застосування. Приклад того як виглядає зі сторони НК ультразвуковим методом можна побачити на рисунку 11.



Рисунок 11 – Використання методу ультразвукового контролю [2]

На основі цього методу на сьогоднішній день маємо більш передові методи ультразвукового контролю.

1.4.1.1 Метод ультразвукової обробки з фазованою решіткою

На відміну від традиційного ультразвукового контролю зонд з технологією УОФР складається з численних маленьких ультразвукових перетворювачів, кожен з яких може генерувати імпульси незалежно один від одного. Завдяки можливості змінювати синхронізацію, наприклад, шляхом прогресивної затримки імпульсів, які надходять від кожного перетворювача, створюється схема конструктивної інтерференції. Це призводить до формування квазіплощинного ультразвукового променя, який випромінюється під певним кутом, що визначається прогресивною затримкою часу [1, 2, 3]. Завдяки цій технології управління променем здійснюється електронним способом, що дозволяє «переміщати» його немов прожектором через досліджуваний матеріал. Дані, зібрані з кількох променів, потім комбінуються для створення візуального зображення, яке надає розріз об'єкта, допомагаючи виявити та оцінити дефекти [2].

Цей підхід значно підвищує достовірність і ефективність ультразвукового контролю, оскільки дозволяє отримувати детальні

зображення внутрішніх структур об'єктів. Завдяки можливості обробки великої кількості даних одночасно, УОФР є особливо корисним у перевірці зварних швів, композитних матеріалів і складних геометричних форм, де якщо порівнювати з традиційними ультразвуковими методами (рис. 12), де УОФР дозволяє формувати та направляти кути ультразвукового променя, забезпечуючи кращий фокус глибини та розширене покриття [2, 3]..

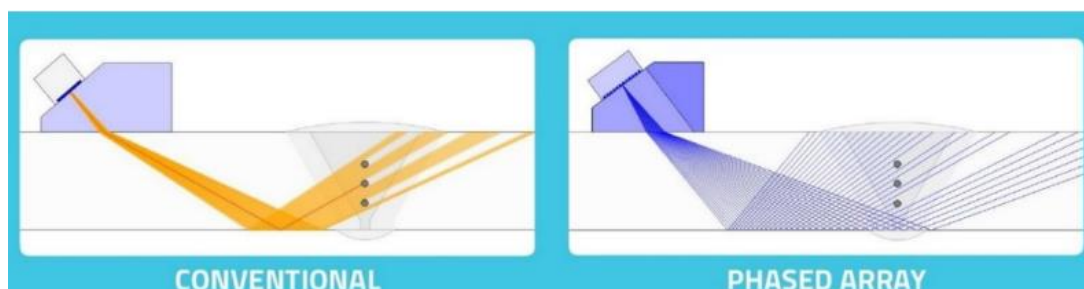


Рисунок 12 – Порівняння між традиційним ультразвуковим контролем і методом УОФР [2]

1.4.1.2 Дифракційно-часовий метод

Замість вимірювання амплітуди відбитого від дефекту сигналу цей метод фокусується на часі, необхідному для проходження ультразвукового імпульсу, аби визначити місце розташування і розміри дефектів, оскільки амплітуда сильно залежить від кута, під яким розташований дефект. Для реалізації методу використовуються дві пари ультразвукових зондів, які встановлюються з обох сторін дефекту. Один з зондів, який виконує роль передавача, посилає ультразвуковий імпульс, а другий зонд, що функціонує як приймач, його приймає [3].

У недеформованих трубах приймач отримує сигнали, які формуються з двох хвиль: одна поширюється по поверхні, а інша - відбивається від внутрішньої стінки. Якщо є дефект, ультразвукова хвиля зазнає дифракції на її вершині. З використанням вимірюного часу, за який імпульс проходить, можна автоматично обчислити глибину дефекту (рис. 13).

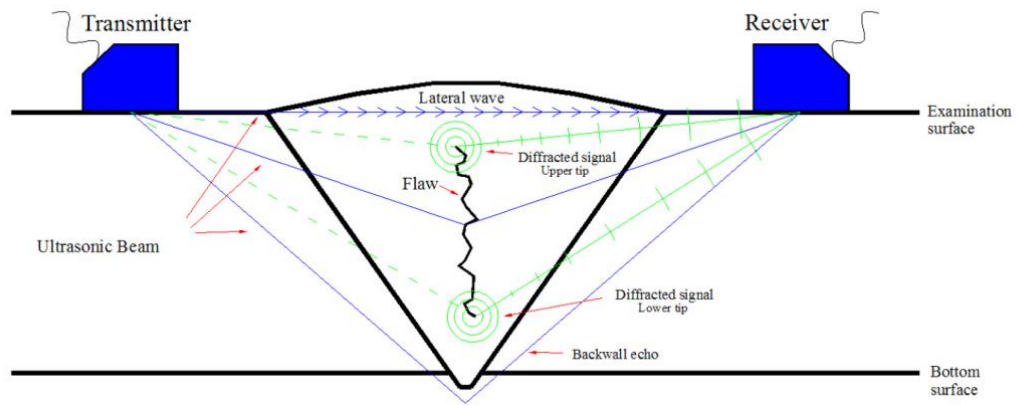


Рисунок 13 – Візуалізація роботи дифракційно-часового методу [2]

Метод є особливо корисним для інспекції зварних нашарувань і зон, що піддаються термічному впливу. Цей метод вважається одним із найшвидших способів НК, оскільки для виявлення дефектів достатньо одного сканування. Однак, він має певні недоліки, зокрема «мертву зону», викликану сигналом бічної хвилі, що утворює область невидимості приблизно до 5 мм під поверхнею.

Проблеми, такі як помилки часу, помилки за віссю та помилки роздільної здатності на зображенні можуть виникнути, якщо було виконано лише одне сканування компонента. Для їх вирішення часто поєднують ДЧМ з УОФР, що дозволяє змінювати кут, ширину і точку входу хвилі (рис. 13). Така комбінація забезпечує інспекторам більш надійний та ефективний сканер, що дозволяє отримувати точніші результати у виявленні та оцінці дефектів [2, 4].



Рисунок 14 – Використання акустичних методів контролю стану мостових конструкцій [2]

В якості прикладу технічного рішення можна навести прилад Veo3 від компанії Sonatest (рис. 15).



Рисунок 15 – Зовнішній вигляд приладу Veo3 [10]

Цей прилад здатний одночасно виконувати аналіз за кількома сучасними методами ультразвукового контролю, такими як УОФР, ДЧМ та УЗК. Він також має можливість передавати результати аналізу за допомогою повного захоплення матриці, що дозволяє збирати дані з кожної пари зондів (приймача та передавача) та оцифровувати їх для подальшої обробки [10]. Завдяки методу тотального фокусування дані обробляються, щоб створити детальні зображення досліджуваної зони, що значно полегшує виявлення та аналіз можливих дефектів [11].

Цей підхід дозволяє отримувати високоякісні візуалізації, що забезпечує більш точне визначення розмірів і локалізації тріщин, корозії або інших недоліків, а також допомагає зменшити ймовірність помилок у оцінці стану матеріалів. Завдяки комплексному аналізу даних інспектори можуть ефективніше приймати рішення щодо подальших дій, підвищуючи надійність і безпеку конструкцій [10]. Його характеристики надані у таблиці 3.

Таблиця 3 – Технічні характеристики Veo3 [10]

<i>Характеристика</i>	<i>УОФР</i>	<i>УЗК-ДЧМ</i>	<i>Метод тотального фокусування</i>
Кількість сканувань	До 8	До 2 (УЗК та ДЧМ)	До 6

Характеристика	УОФР	УЗК-ДЧМ	Метод тотального фокусування
Передавач/Приймач	32:128	2	Зонд до 64
Діапазон посилення	80дБ	100дБ	80дБ
Частота вибірки	125 МГц 12-бітний	50/100/200 МГц 10-бітний	125 МГц 12-бітний (обробка 16 біт)
Пропускна здатність системи	Від 0,2 до 23 МГц	Від 0,2 до 18 МГц	Від 0,2 до 23 МГц
Живлення	110В/240В 50Гц/60Гц		

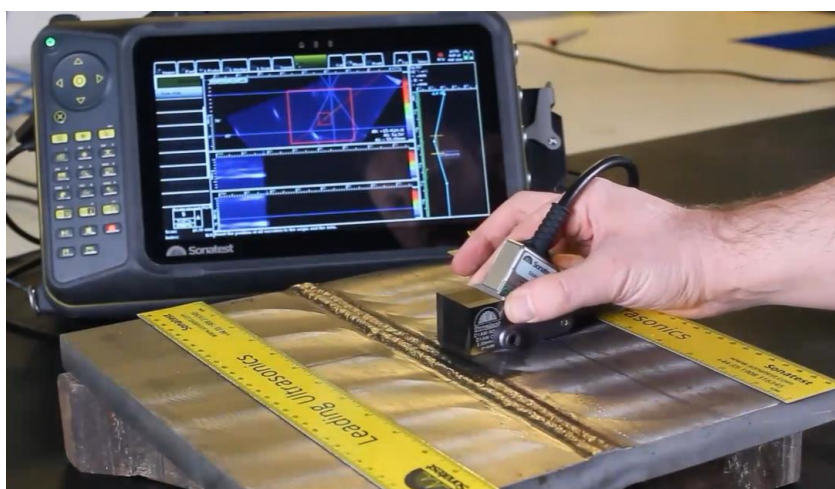


Рисунок 16 – Робота приладу Veo3 на макеті [10]

1.4.2 Радіаційний метод

Радіаційний метод НК базуються на використанні іонізуючого випромінювання, яке, проходячи крізь матеріал, по-різному послаблюється в дефектних і бездефектних областях. Це випромінювання дозволяє отримати цінну інформацію про внутрішню структуру матеріалу та наявність дефектів всередині об'єкта, що контролюється [1, 3].

Під час радіографічного тестування об'єкт розміщують між джерелом випромінювання та детектором (наприклад, плівкою або цифровим сенсором). Різниця в щільності та товщині матеріалу спричиняють варіації інтенсивності випромінювання, яке проходить через об'єкт. Ці варіації, що виникають

внаслідок розсіювання та поглинання випромінювання, реєструються на плівці або за допомогою цифрових засобів для подальшого аналізу.

Радіографія дає змогу отримати візуальне зображення внутрішнього стану та структури об'єкта, використовуючи рентгенівське або гамма-випромінювання. Цей метод особливо корисний для виявлення внутрішніх дефектів, таких як пористість, тріщини та включення у зварних швах, що можуть бути приховані від візуального огляду. Незважаючи на те, що радіографія може бути повільною та дорогою, вона є однією з найдостовірніших процедур, яка забезпечує виявлення дефектів на ранніх стадіях [4].

Обладнання для радіографічного тестування включає джерело випромінювання, касету з плівкою або цифровий плоский детектор, пенетрометр та обладнання для обробки плівки. Радіографія не вимагає значної підготовки поверхні, що робить її ефективною для виявлення підповерхневих дефектів, прихованих від візуального огляду.

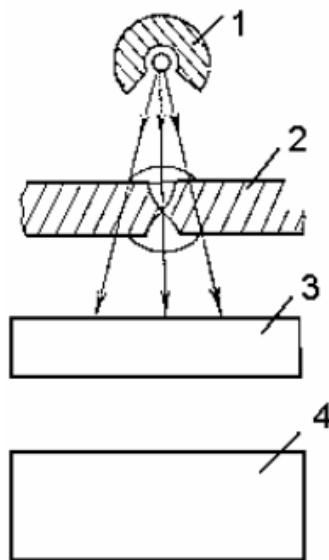


Рисунок 17 – Узагальнена структура системи радіаційного контролю [1]:

1 – джерело випромінювання; 2 – об'єкт контролю; 3 – детектор випромінювання; 4 – засіб розшифровки та оцінки контролю

У процесі випромінювання через матеріал інтенсивність випромінювання реєструється на фотоплівці або флуоресцентному екрані, залежно від щільності матеріалу. Радіографія має рентгенівську чутливість на рівні 2%, тобто здатна виявити пустоти розміром до 0,4 мм у елементах розміром 20 мм [2].

Однак метод має й недоліки, серед яких повільність виконання, висока вартість, необхідність в суворих заходах безпеки при роботі з іонізуючим випромінюванням, непридатність для товстих секцій, а також потреба в дорогому обладнанні та спеціальній підготовці інспекторів. Ці фактори обмежують застосування радіографії, хоча вона залишається важливим інструментом для контролю критично важливих компонентів, таких як сталеві зварні конструкції мостів [1, 4].

Прикладом технічного рішення використання рентгенівського випромінювання для НК може слугувати система Leonardo DR mini III компанії OR Technology.



Рисунок 18 – Зовнішній вигляд системи Leonardo DR mini III [13]

Завдяки своїм малим габаритам її можна використовувати у польових умовах для моніторингу об'єктів інфраструктури, нафтогазової галузі тощо на відміну від аналогів, які можуть запропонувати аналіз окремих виробів у лабораторних умовах.



Рисунок 19 – Інспекція сталевих труб радіаційним методом [2]

Висновки до розділу 1

Проаналізувавши сучасні найбільш поширені методи НК феромагнетиків можна коротко підсумувати всі їх переваги та недоліки, а також обґрунтувати вибір базового з них для подальшого використання в дослідженнях, які представлені у таблиці 4.

Таблиця 4 - Загальні переваги та недоліки розглянутих методів

<i>Назва методу</i>	<i>ПЕРЕВАГИ</i>	<i>НЕДОЛІКИ</i>
Капілярний метод	Простий, дешевий, швидкий. Ефективний для виявлення поверхневих дефектів	Виявляє виключно поверхневі дефекти. Непрактичний для огляду пористих поверхонь, потреба в обробці поверхонь
Магнітопорошковий метод	Швидкий, легкий для автоматизації, дешевий	Точність залежить від розміру зонда, необхідність розмагнічення, потреба в обробці поверхні
Вихрострумний метод	Швидкий, не потребує обробки поверхні, виявляє сховані дефекти і визначає їх розмір	Точність залежить від розміру зонда, не підходить для складної геометрії, чутливий до електромагнітного шуму
Акустичні методи	Дуже чутливий, швидкий, аналіз достатньо проводити з однієї сторони виробу	Дорожчий у порівнянні з іншими методами, менш ефективний для малих речей.

<i>Назва методу</i>	<i>ПЕРЕВАГИ</i>	<i>НЕДОЛІКИ</i>
Радіаційний метод	Мінімальна підготовка поверхні, дуже чутливий, одночасно може переглянути велику площу виробу	Дуже дорогий, необхідна спеціальна підготовка для користування, повільний, погано працює з товстими зрізами і не може вказати глибину дефекту під поверхнею
Метод ефекту Баркгаузена	Швидка індикація результату, простота конструкції, прогнозування стану матеріалу	Непрактичний у випадку виявлення дефектів на великій глибині, чутливий до зовнішніх факторів.

Проаналізувавши переваги та недоліки кожного з розглянутих методів, МЕБ було обрано як базовий для подальшого дослідження. Цей вибір обґрунтований низкою факторів.

За швидкістю виконання він подібний до капілярного та магнітопорошкового методів, але має більшу глибину контролю за рахунок зменшення частоти вхідного сигналу. І хоча за глибиною проникнення він все ж поступається акустичному та радіаційному методам, МЕБ виграє у них завдяки своїй простоті реалізації, економічній вигідності та можливості швидкого отримання результатів.

Головною перевагою цього методу є здатність прогнозувати стан матеріалу шляхом визначення залишкових напружень. Це дозволяє не лише виявляти існуючі дефекти, але й оцінювати ризик виникнення нових, а також запобігати потенційним аварійним ситуаціям. Завдяки цим характеристикам МЕБ був обраний як базовий метод для майбутньої безпроводної системи моніторингу.

РОЗДІЛ 2. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЕФЕКТУ БАРКГАУЗЕНА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

2.1 Фізична основа ефекту Баркгаузена

МЕБ базується на унікальному фізичному явищі, яке виникає в феромагнітних матеріалах під дією змінного магнітного поля. Основою методу є стрибкоподібна зміна намагніченості через переміщення доменних стінок – меж між областями (доменами), де магнітні моменти атомів орієнтовані в одному напрямку.

У відсутність зовнішнього магнітного поля домени орієнтовані хаотично, компенсуючи магнітні моменти один одного, що робить результуючу намагніченість матеріалу рівною нулю. Під впливом магнітного поля домени змінюють орієнтацію, прагнучи вирівнятися в напрямку поля, а доменні стінки зміщуються [13].

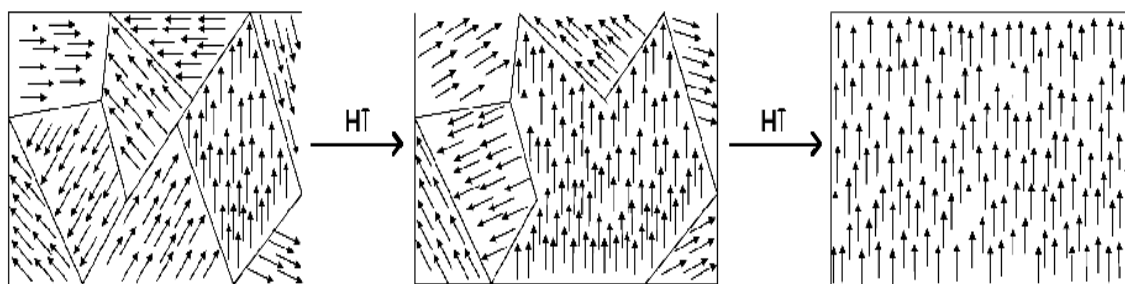


Рисунок 20 – Перебудова доменної структури [13]

Переміщення доменних стінок відбувається нерівномірно та супроводжується стрибками (шумом) Баркгаузена, які виникають через дефекти, домішки або залишкові механічні напруження в матеріалі.

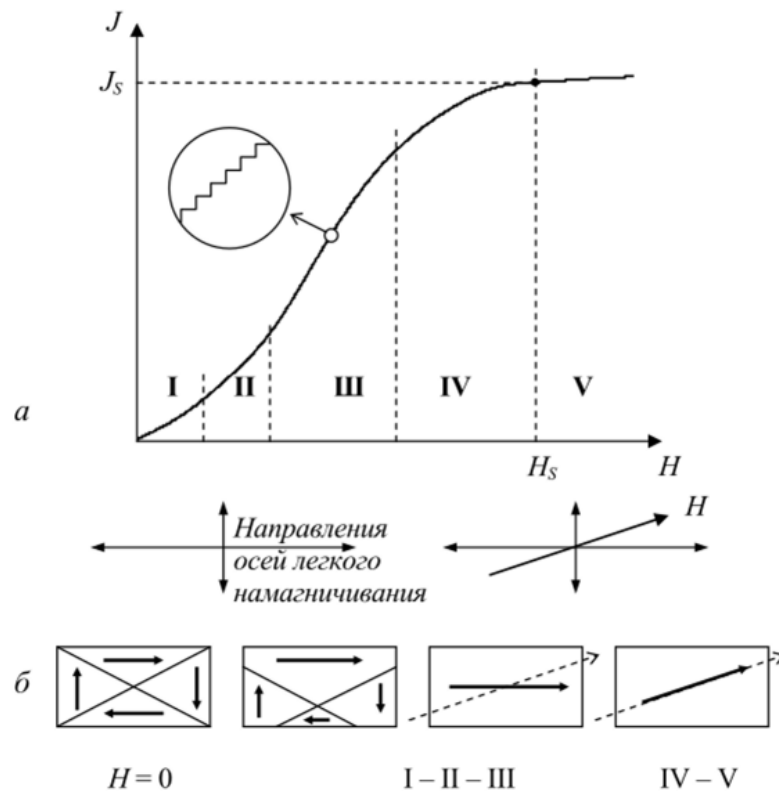


Рисунок 21 Крива намагніченості (а) та процес перебудови доменної структури (б) [14]

Під час збільшення магнітного поля домени вирівнюються, а намагніченість матеріалу зростає, досягаючи стану магнітного насичення. Коли поле зменшується, домени намагаються повернутися до початкового стану, однак залишкове магнітне поле, зумовлене гістерезисом, перешкоджає повному відновленню хаотичного вирівнювання [14].

Цей метод є ефективним для визначення напруженого стану матеріалу, оскільки амплітуда та кількість імпульсів ефекту Баркгаузена прямо залежать від механічного навантаження на феромагнітний об'єкт. Наприклад, під час розтягнення амплітуда імпульсів зростає, що пов'язано з додатковим зміщенням доменних меж у напрямку навантаження. Навпаки, при стисканні кількість і інтенсивність імпульсів зменшується (рис. 22) [8].

Ефект Баркгаузена дозволяє визначати залишкові напруження у матеріалі, а також контролювати процеси старіння, зношування або термічної обробки. Висока чутливість методу до мікроструктурних змін робить його

універсальним інструментом як для наукових досліджень, так і для промислового НК.

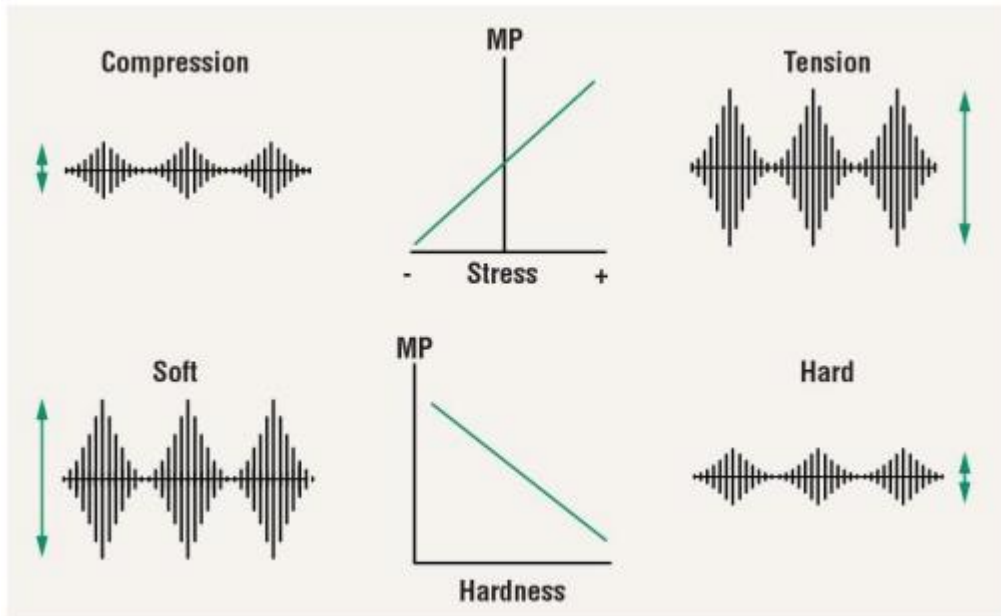


Рисунок 22 – Залежність амплітуди шуму Баркгаузена від типу напруженості та виду матеріалу [8]

Таблиця 5 - Параметри магнітного шуму під час різного навантаження

<i>Тип напруженості</i>	<i>Амплітуда імпульсів</i>	<i>Кількість імпульсів</i>	<i>Характер змін доменних меж</i>
Розтягнення	Висока	Зростає	Зміщення
Стиснення	Низька	Зменшується	Ускладнення
Відсутність навантаження	Стабільна	Низька	Незначні коливання

2.2 Метод Баркгаузена як інструмент вимірювання напружень і деформацій

Феромагнітний матеріал складається із магнітних доменів - областей, у яких спіни електронів орієнтовані в одному напрямку. Коли на матеріал впливає змінне магнітне поле $H(t)$, доменні стінки починають рухатися:

$$\Delta M = \sum_{i=1}^n \Delta M_i \quad (2.2.1)$$

де ΔM_i - зміна намагніченості через переміщення i -тої доменної стінки [15].

Механічні напруження впливають на рух доменних стінок через магніострикційний ефект.

Взаємодія між зовнішніми напруженнями σ та магніострикційним розширенням змінює амплітуду і частотний спектр шумів Баркгаузена.

Залежність інтенсивності шумів Баркгаузена від напружень можна апроксимувати формулою:

$$I_B = f(\sigma) \cdot H \quad (2.2.2)$$

де: I_B - інтенсивність шумів; $f(\sigma)$ – функція, що описує механічні напруження σ ; H – магнітне поле.

Чим більша активність стрибків тим більша амплітуда сигналу. Амплітуда сигналу, зазвичай, вимірюється у відносних одиницях напруги, які реєструє датчик.

Для реєстрації шумів Баркгаузена застосовують електромагніт, який генерує змінне магнітне поле, а також датчик (катушку), що індукує сигнал у відповідь на зміну магнітного потоку.

Обробка отриманого сигналу здійснюється за допомогою системи аналізу, яка може включати підсилювач та спектроаналізатор або простий вольтметр, підключений до датчика. Зразок матеріалу піддається механічному напруженню σ , після чого результати вимірювань можна візуалізувати та аналізувати через систему обробки сигналу. На вольтметрі це можна побачити на зміні напруги.

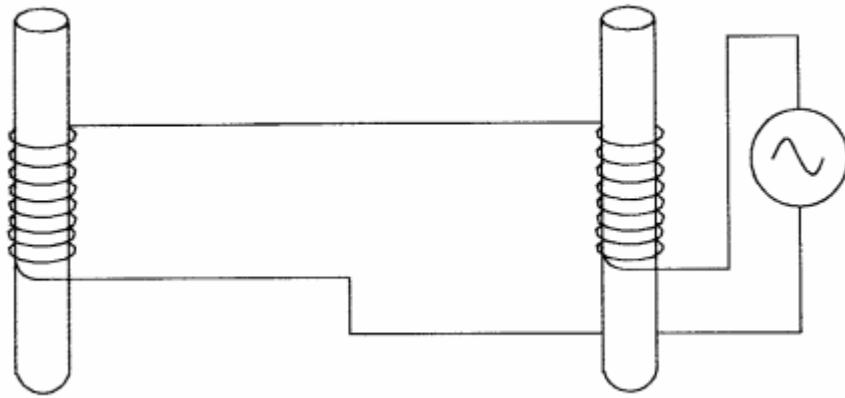


Рисунок 23 – Спрощена схема датчика та індикації сигналу [16]

Якщо користуватись спектроаналізатором, то сигнал Баркгаузена аналізується за допомогою швидкого перетворення Фур'є [16].

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} U_B(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.2.3)$$

де $F(f)$ – амплітудно-частотний спектр сигнал, який описує розподіл енергії сигналу за частотами; f – частота, t – час.

Аналіз спектру дозволяє виділити частоти руху доменних стінок і зрозуміти вплив механічних напружень на активність доменів.

Основний інтерес при аналізі результатів становлять амплітуда та положення піків у спектрі, які корелюють із рівнем напружень у матеріалі [15]. $U_B(t)$ – сигнал Баркгаузена у часовій області, у вигляді загасаючої синусоїдального коливання, яке характеризує магнітну активність. Він складається з імпульсів, які виникають через стрибки доменних стінок під впливом магнітного поля:

$$U_B(t) = A \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin(2\pi f_0 t) \quad (2.2.4)$$

де:

A - початкова амплітуда

α – швидкість затухання сигналу з часом

f_0 – основна частота сигналу.

2.3 Фактори впливу на МЕБ

МЕБ має високий рівень чутливості, однак, на результати вимірювань можуть суттєво впливати різні зовнішні фактори, які необхідно враховувати для забезпечення точності та надійності аналізу. Це можуть бути зовнішні магнітні поля або електромагнітні завади від навколишнього обладнання. Ці впливи можна нівелювати калібруванням обладнання аби врахувати вплив зовнішніх умов, механічну стабілізацію, для уникнення заважаючих вібрацій, але окремо треба виділити температурні коливання.

Температура прямо впливає на магнітну проникність та коерцитивну силу матеріалу. Підвищення температури може зменшувати намагніченість насичення, що змінює амплітуду та частоту шумів Баркгаузена. Тому стабільність температури під час вимірювань є критично важливою.

Феромагнетизм виникає лише за температур нижче певної критичної точки, яка називається температурою Кюрі. Ця температура залежить від речовини, наприклад, для заліза та кобальту становить близько 1000 К. За температур вище точки Кюрі магнітні моменти орієнтовані випадковим чином, що призводить до нульової сумарної намагніченості [17]. У цьому стані речовина стає парамагнітною і її сприйнятливість (χ) визначається законом Кюрі-Вейса:

$$\chi = \frac{C}{T - T_c} \quad (2.3.1)$$

де C – константа Кюрі, T – температура, T_c – температура Кюрі (для сталі це температура ~ 770 С°).

Константа Кюрі – це значення, яке характерна і постійне для певної речовини, що пов'язує магнітну проникність з температурою:

$$C = \mu_0 \cdot n \frac{\mu^2}{3k_B} \quad (2.3.2)$$

де, μ_0 – магнітна стала, n – густина частинок, μ – атомарний магнітний момент, k_B – стала Больцмана.

Температура Кюрі є критичною точкою, вище якої феромагнітна речовина втрачає свою намагніченість і переходить у парамагнітний стан. Нижче цієї температури магнітні моменти орієнтуються в одному напрямку завдяки сильній взаємодії. Магнітна сприйнятливість визначає, наскільки сильно матеріал намагнічується під впливом зовнішнього магнітного поля [17]. Вона визначається як відношення магнітної намагніченості до прикладеного магнітного поля:

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (2.3.3)$$

Ця формула може бути використана для оцінки залишкових напружень у феромагнітних матеріалах через аналіз сигналів ефекту Баркгаузена. Наприклад, при неруйнівному контролі мостових конструкцій магнітне поле, яке створюється у зоні аналізу, сприяє збудженню магнітного шуму.

Якщо говорити про магнітну проникність (μ), то при збільшенні температури та наближенні до температури Кюрі магнітна проникність досягає максимуму [17]. Це добре можна побачити на рис. 24, де показана залежність від температури для магнітом 'яких феритів.

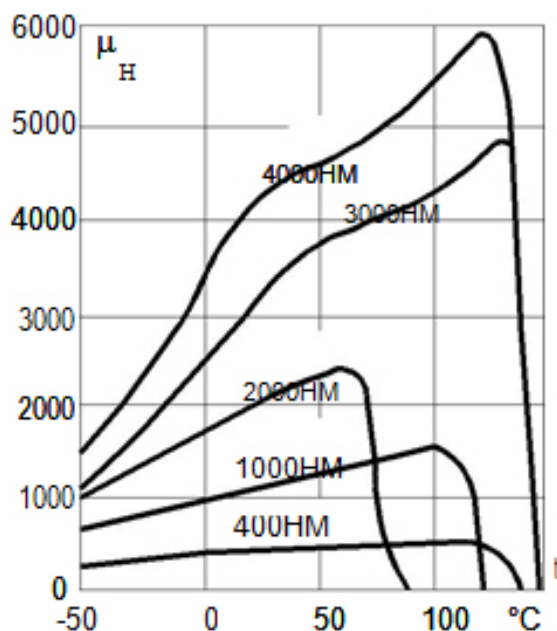


Рисунок 24 – Залежності початкової магнітної проникності від температури для марганець-цинкових і нікель-цинкових феритів [18]

Для магнітотвердих феромагнетиків залежність від температури виглядає інакше. У таких матеріалів стан намагніченості зберігається досить тривалий час і значення проникності більш стабільне при наближенні до температури Кюрі, але по аналогії з магнітом'якими феромагнетиками проникність також різко знижується при наближенні до цієї температури. Це викликано руйнуванням доменної структури. Після точки Кюрі значення магнітної проникності стає близькою до одиниці [17].

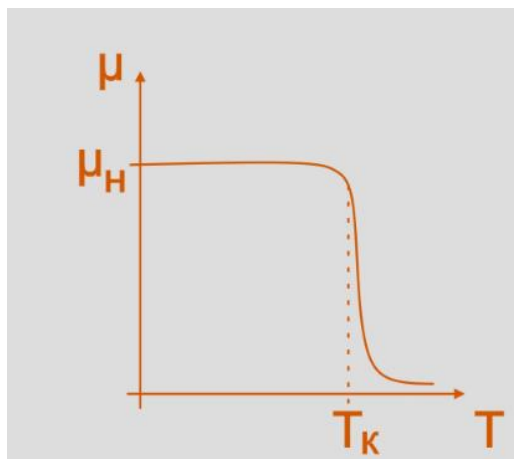


Рисунок 25 – Залежність магнітної проникності від температури для магнітотвердих феромагнетиків [19]

Для досліджень за темою дисертації це важливо, оскільки при будівництві мостових конструкцій найчастіше застосовуються вуглецеві та низьколеговані сталі, які забезпечують оптимальне поєднання високих механічних властивостей, зокрема, міцності та пластичності. Ці сталі широко використовуються як у малих, так і у великих мостових конструкціях завдяки їх здатності витримувати значні статичні та динамічні навантаження протягом тривалого часу експлуатації.

Хоча магнітні властивості вуглецевих та низьколегованих сталей не є визначальними для їхнього вибору у мостобудуванні, їх феромагнітна природа відкриває додаткові можливості для НК.

Вуглецеві та низьколеговані сталі відносяться до магнітом'яких матеріалів, що дозволяє їм ефективно взаємодіяти з магнітними полями без

втрати властивостей після зняття намагнічування. Це створює перевагу для конструкцій, де важливо забезпечити поєднання механічної витривалості з можливістю ефективної діагностики та технічного моніторингу.

Такі матеріали дозволяють використовувати магнітні методи контролю для виявлення поверхневих і внутрішніх дефектів, зокрема тріщин, розшарувань або зон підвищених напружень.

2.4 Аналіз конструкторських рішень реалізації методу ефекту Баркзаузена

Баркзаузена

З метою створення власної конструкції індуктивного пристрою проаналізуємо приклади відомих конструкцій датчиків, що реалізують МЕБ. Розглянуто їх технічні особливості, принципи роботи та переваги використання для моніторингу стану феромагнітних матеріалів.

Датчик ДМАД-25

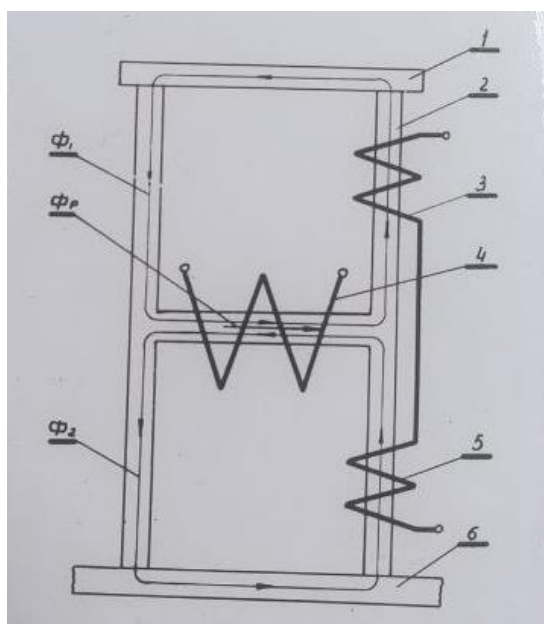


Рисунок 26 – Конструкція індуктивного датчика ДМАД-25 [20]:

Φ_1, Φ_2 – магнітні потоки в контурах; Φ_p – магнітний потік розбалансу;

1 – Еталон; 2 – Магнітопровід; 3 - Намагнічуюча котушка;
4 - Індикаторна котушка; 5 - Намагнічуюча котушка; 6 - Контрольний виріб

Принцип роботи цього датчику (рис. 26) полягає у наступному. На входи намагнічуючих котушок, з'єднаних послідовно, подається змінний струм

напругою 18 вольт і частотою 50 Гц. Струм, що проходить по котушках 3 і 5, створює в магнітопроводі 2 магнітні потоки. Магнітний потік Φ_1 замикається по верхньому контурі магнітопроводу, куди включений еталон, а магнітний потік Φ_2 - по нижньому контуру магнітопроводу, куди включено контрольний виріб, в якому необхідно виміряти залишкові напруги [20].

У загальному вигляді магнітний опір R_M магнітному потоку дорівнює:

$$R_M = \frac{l}{\mu \cdot S} \quad (2.4.1)$$

де l , S – довжина та площа поперечного перерізу магнітопроводу, яким замикається магнітний потік, μ – магнітна проникність.

В нашому випадку опір магнітним потокам можна визначити:

$$R_{M\Phi 1} = \frac{l}{\mu_1 \cdot S} \quad (2.4.2)$$

$$R_{M\Phi 2} = \frac{l}{\mu_2 \cdot S} \quad (2.4.3)$$

де μ_1, μ_2 - магнітні проникності верхнього та нижнього контурів магнітопроводу датчика, які залежать від залишкових напружень еталона та виробу.

Магнітна проникність еталона буде відрізнятися від проникності контрольованого виробу, оскільки в еталоні відсутні залишкові напруження. Результуючий магнітний потік Φ_p наводить в індикаторній котушці 4 ЕРС, котра залежить від значення залишкової напруги у контрольному виробі.

Тестер ударної в'язкості

Корейська компанія Heavy Industries & Construction Company розробила датчик шуму Баркгаузена для отримання даних про ударну в'язкість кованої оболонки зі сталі SA 508 класу 3, яка використовується для корпусів реакторів з водою під тиском [21].

Датчик складається з феритового сердечника та котушки збору сигналу з 2000 витками (див. рис. 27а). Змінне магнітне поле створюється магнітним

ярмом із 1000 витків, яке збуджується трикутними хвилями напругою 10 В і частотою 0,5 Гц, що генеруються функціональним генератором.

Датчик встановлюється вертикально на поверхню зразка для вимірювання змін магнітного потоку, який виникає під час намагнічування матеріалу. Вимірний сигнал шуму Баркгаузена після підсилення та проходження через смуговий фільтр відображається на графіку (див. рис. 27b).

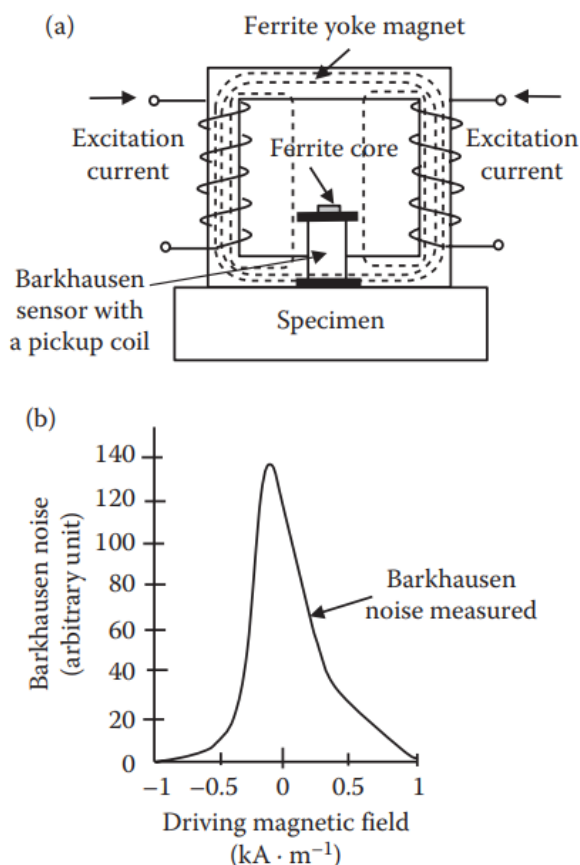


Рисунок 27 - а) конструкція тестера ударної в'язкості; б) залежність шуму Баркгаузена від магнітного поля [21]

Датчик напруги Баркгаузена

Розроблений Технічним університетом Щецина в Польщі та призначений для виявлення змін у матеріалі, викликаних механічними напруженнями. Він складається з котушки збудження на 800 витків, двох знімних котушок на 2000 витків та алюмінієвого корпусу, який виконує функцію екранування. Котушка збудження, виготовлена з дроту діаметром

0,25 мм, намотана на С-подібний феритовий сердечник і збуджується синусоїдальним струмом частотою 30 Гц. Знімні котушки, виготовлені з мідного дроту діаметром 0,02 мм, з'єднані послідовно та розташовані одна над одною, розділені полюсними наконечниками феритового сердечника [21].

Нижня котушка безпосередньо контактує із властивостями зразка, тоді як верхня реєструє сигнали, не пов'язані із матеріалом, що дозволяє зменшити вплив зовнішніх шумів. Відстань між полюсами феритового сердечника становить 10 мм, що забезпечує високу чутливість до змін у структурі матеріалу.

Вихідний сигнал датчика проходить через схему обробки, яка включає ВЧ фільтр із частотою зрізу 500 Гц та підсиленням 50 дБ, а також НЧ фільтр із частотою зрізу 30 кГц та підсиленням 10 дБ. Після цього сигнал подається на АЦП із частотою дискретизації 500 кГц. Для забезпечення точності аналізу в кожній точці зразка проводять кілька вимірювань, а медіанне значення енергії сигналу використовується як підсумковий результат [21].

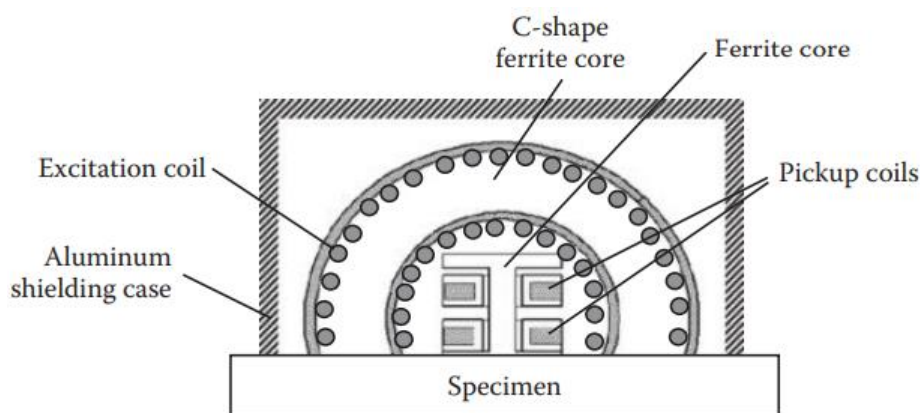


Рисунок 28 – Конструкція датчика напруги Баркгаузена [21]

Датчики компанії Stresstech GmbH

Ще один приклад рішень демонструє компанія Stresstech, яка спеціалізується на розробці та виробництві обладнання для НК, зокрема, систем, що використовують МЕБ. Системи складаються із сенсорів та систем обробки даних з цих сенсорів. Є варіація сенсорів, які відрізняються між собою напрямком вимірювання датчика.

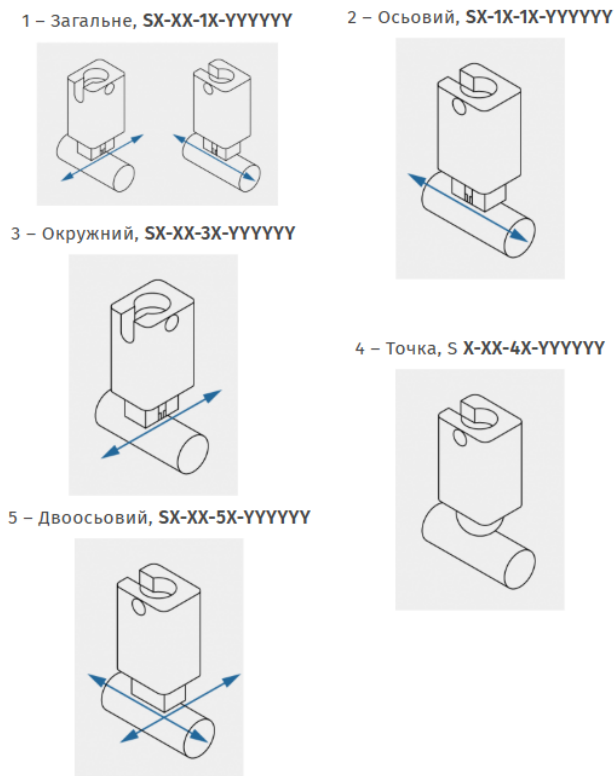


Рисунок 29 - Різноманітність датчиків за напрямком намагнічування виробу [22]

Такі датчики підходять для контролю зовнішніх поверхонь феромагнітних деталей, опорні поверхні та поверхні між пелюстками розподільного валу, шестерні, свердла. Сенсори можуть мати від 1 до 4 каналів витoku інформації, що дозволяє проводити паралельні вимірювання поверхні виробів. Глибина проникнення сигналу ефекту Баркгаузена варіюється в межах від 0,01 мм до 1 мм. При цьому сигнал поступово слабшає через скін-ефект, який виникає внаслідок появи вихрових струмів, спрямованих протилежно до зміни магнітного поля.

Оцінку глибини проникнення сигналу шуму Баркгаузена можна розрахувати за такою формулою:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot \sigma \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu}} \quad (2.4.4)$$

де σ – електропровідність матеріалу, f – частота сигналу, μ_0 – магнітна константа, μ – відносна магнітна проникність.

Щодо системи обробки сигналу, то компанія Stresstech GmbH пропонує декілька основних варіантів рішень аналізаторів сигналу, зокрема, Rollscan 250.

Аналізатор сигналу Rollscan 250 [22]

Кількість каналів вимірювання: 2

Діапазон сигналу намагнічування: (0-16) В

Форма магнітного сигналу: синусоїдальна / трикутна

Діапазон частот намагнічування:

- Синусоїдальна хвиля: (1-1000) Гц
- Трикутна хвиля: (1-150) Гц

Частотний діапазон фільтрів аналізу: (70-200) кГц

Працює від змінного струму з напругою (90-240) В, частота (47–63) Гц.

Номінальне споживання потужності — максимум 100 Вт.

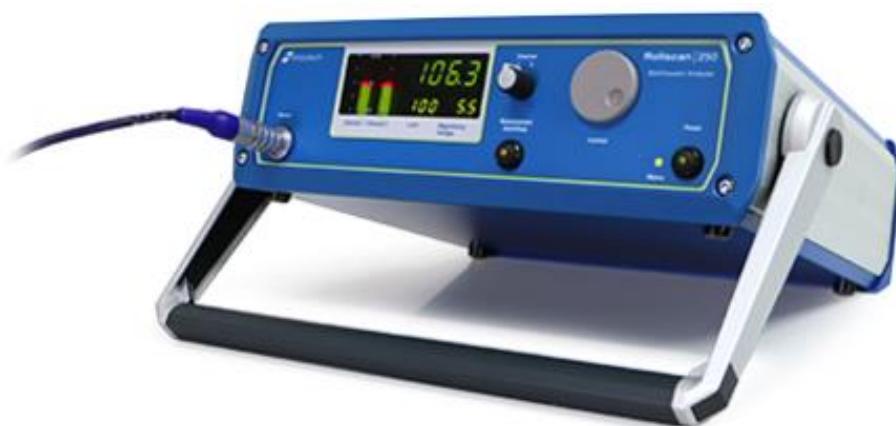


Рисунок 30 – Зовнішній вигляд аналізатора сигналу Rollscan 250 [22]

Зазначені системи використовуються для контролю якості в різних галузях, включаючи:

- Автомобільну промисловість (для перевірки компонентів двигунів, трансмісій).

- Аерокосмічну промисловість (для тестування деталей літаків).
- Металургію (для оцінки стану металевих конструкцій).
- Енергетичний сектор (для контролю обладнання на електростанціях).

Як показав проведений вище аналіз існуючих конструкторських рішень засобів моніторингу, що базуються на ефекті Баркгаузена, цей метод має широкий спектр застосувань, зокрема, для оцінки залишкових напружень, виявлення дефектів і контролю структурних змін у матеріалах. Це свідчить про його універсальність та високу чутливість до змін у магнітних і механічних властивостях матеріалів.

Аналіз конструкцій датчиків також дозволив запропонувати конструкцію власного технічного рішення – індуктивного пристрою для оперативного визначення стану металевої конструкції з можливістю прогнозування виникнення дефектів і деформацій у матеріалі на ранніх стадіях.

2.5 Розроблення конструкції індуктивного сенсору на основі методу ефекту Баркгаузена

Розроблений індуктивний сенсор є диференціальним перетворювачем трансформаторного типу. Його конструкція включає первинну обмотку, що виконує функцію намагнічування, створюючи змінне магнітне поле та вторинну індикаторну обмотку, яка приймає сигнал у вигляді ЕРС.

Цей сигнал є інформативним параметром, що характеризує магнітні властивості матеріалу і дозволяє оцінити зміни, викликані механічними напруженнями або дефектами. Вторинна обмотка підключена до вимірювального тракту, який фіксує ЕРС та передає отримані дані на обробку на обчислювальний компонент. Зміна ЕРС в меншу або більшу сторону буде вказувати на природу напружень, що діють на матеріал.

Обидві обмотки розміщені на П-подібних феритових сердечниках, які встановлені під кутом 90° один до одного. Така конструкція дозволяє ефективно локалізувати магнітне поле та зменшити вплив зовнішніх перешкод на процедуру вимірювання.

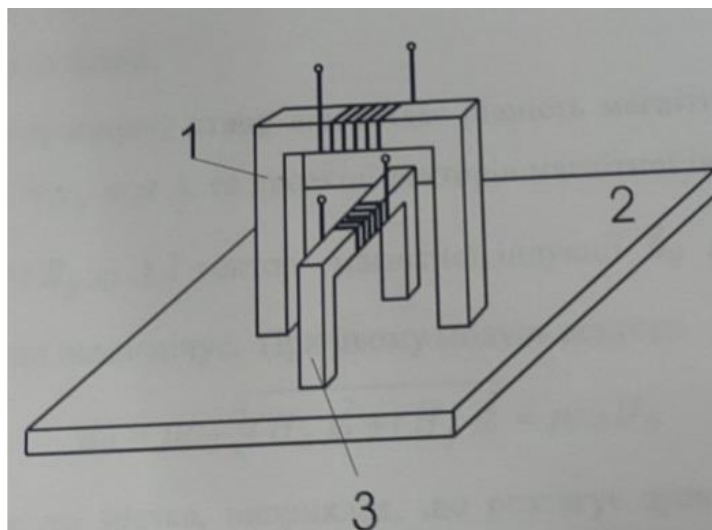


Рисунок 31 - Індуктивний сенсор (1, 3 – магнітопружні осердя, 2 – феромагнетичний матеріал)

Для підвищення точності вимірювань осердя необхідно екранувати, щоб захистити сенсор від впливу навколишніх факторів. Екранування створює бар'єр, який запобігає проникненню зовнішніх електромагнітних полів та інших завад у робочу область сенсора. Це дозволяє зменшити рівень шумів і забезпечити стабільність магнітного поля, створюваного сенсором, що, у свою чергу, гарантує більш точну і надійну реєстрацію змін у матеріалі, викликаних механічними напруженнями чи дефектами.

Запропонована конструкція індуктивного сенсора є основою для створення інтелектуального пристрою з радіомодемом як базового вузла розподіленої безпроводної системи для моніторингу стану мостових конструкцій. Мостові конструкції цілодобово перебувають в експлуатації, зазнаючи постійного впливу механічних напружень від транспортного потоку, ваги власної конструкції та змінних зовнішніх факторів, таких як вітер, температура чи сейсмічні коливання. Це створює значне навантаження на

матеріали, з яких виготовлений міст і з часом призводить до виникнення дефектів, мікротріщин або критичних деформацій.

Висновки за розділу 2

Розглянуто сутність ефекту Баркгаузена та метод контролю деформацій і напружень на його основі. Це дозволило краще зрозуміти природу явища, його фізичну основу та можливості застосування для вимірювання залишкових напружень і деформацій у феромагнетиках. Описано ключові аспекти механізму виникнення магнітних імпульсів, обумовлених переміщенням доменних стінок, а також вплив структурних дефектів і залишкових напружень на цей процес. Проведено аналіз існуючих конструкторських рішень для реалізації МЕБ. Це дало змогу визначити їхні ключові особливості, такі як чутливість, точність і надійність, а також виявити основні недоліки, наприклад, чутливість до зовнішніх завад. На базі розглянутих конструктивних рішень було обрано конструкцію індуктивного сенсора, який стане основою для розробки інтелектуального пристрою з радіомодемом.

Розроблений сенсор інтегрується у вузол безпроводної системи моніторингу, що дозволяє здійснювати контроль стану матеріалів у реальному часі. Це відкриває нові можливості для ефективного прогнозування стану конструкцій та запобігання аваріям.

РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ЕФЕКТУ БАРКГАУЗЕНА

3.1 Розробка структурно-функціональної організації безпроводної системи моніторингу

Запропонована вище в підрозд. 2.5 конструкція індуктивного сенсору на основі ефекту Баркгаузена дозволяє перейти до створення інтелектуального пристрою, який включає в себе інтеграцію різних структурних складових, зокрема, власне як індуктивного сенсору з елементами керування та узгодження, так і обчислювального компоненту на базі мікроконтролера з необхідними периферійними вузлами, включаючи інтегральний радіомодем. Зазначені структурні складові дають змогу проводити пристрою достовірний моніторинг стану конструкцій у режимі реального часу. Він здатен фіксувати накопичення залишкових напружень і ранні ознаки деградації матеріалу, що є ключовим для прогнозування моменту, коли конструкція може досягти критичного стану.

Реалізація такого пристрою із безпроводною передачею даних є основою для побудови безпроводної системи моніторингу, яка дозволяє оперативно інформувати відповідні служби про ризик виникнення в конкретній локації мостової конструкції аварійних ситуацій. Це також забезпечує можливість вчасного прийняття рішень щодо проведення ремонтних чи профілактичних робіт, запобігаючи небезпечним ситуаціям і збільшуючи термін безпечної експлуатації мостових конструкцій.

Таким чином, така система моніторингу не лише дозволяє підвищити безпеку, але й дає змогу оптимізувати витрати на обслуговування та ремонт інфраструктури.

Враховуючи зазначене вище, розглянемо структурно-функціональну організацію такої безпроводної системи моніторингу (рис. 32, основу якої в якості вузла складає інтелектуальний пристрій з індуктивним сенсором з

ефектом Баркгаузена. Як зазначалося вище, основне завдання системи полягає в забезпеченні ефективного збору, обробки та аналізу даних про стан матеріалів під впливом механічних напружень.

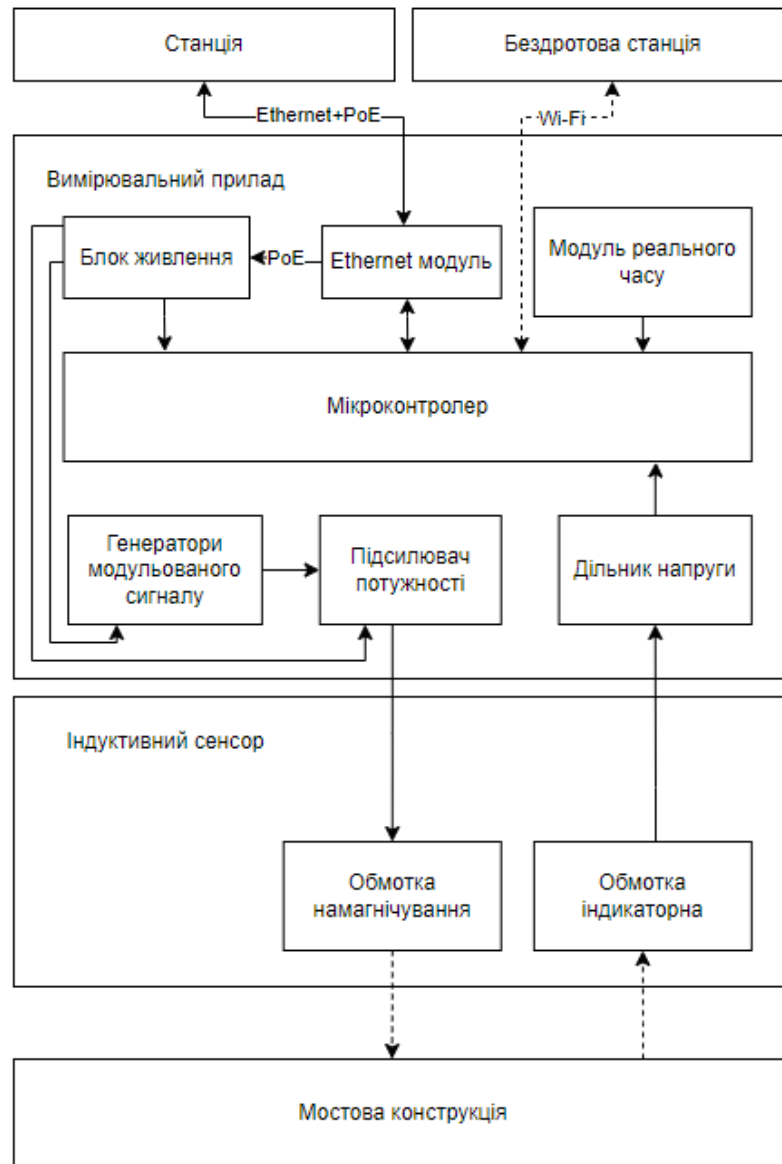


Рисунок 32 – Структурно-функціональна організація безпроводної системи моніторингу стану мостових конструкцій

Нижче детально розглянемо кожен із складових запропонованої організації системи, їх функції та взаємодію, що дозволить зрозуміти її загальну архітектуру і принцип роботи всієї системи моніторингу.

3.1.1 Генератори модульованого сигналу

Генератори частоти є компонентом електронних систем, що використовуються для створення сигналів із заданими характеристиками. У цьому випадку генератори побудовані на основі операційних підсилювачів із використанням мостів Віна, які забезпечують формування гармонійних сигналів із високою стабільністю та мінімальним рівнем спотворень.

Міст Віна є класичним рішенням для генераторів гармонійних сигналів і базується на позитивному зворотному зв'язку через RC-кола, що дозволяє налаштовувати частоту генерації сигналу шляхом зміни параметрів резисторів і конденсаторів.

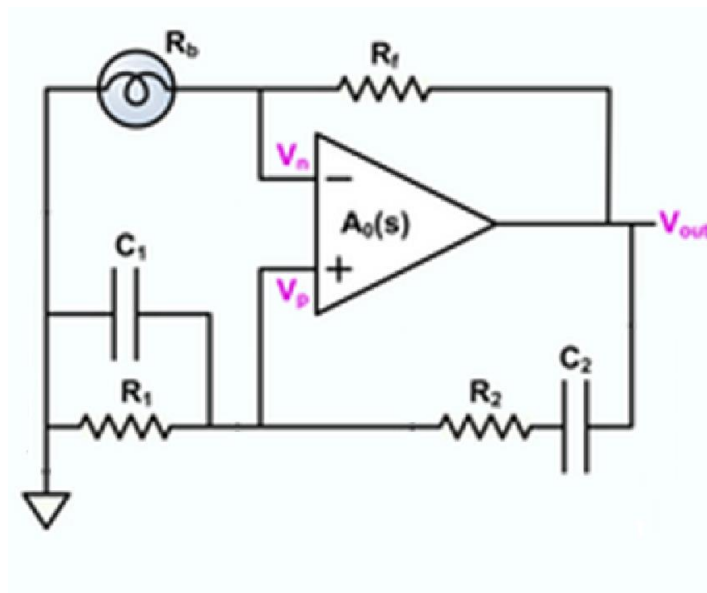


Рисунок 33 - Генератор гармонійних сигналів на мості Віна [23]

Запропонована організація системи передбачає використання 2-х каскадів генераторів:

- перший генерує НЧ модулюючий сигнал;
- другий генерує ВЧ сигнал-носії.

Це рішення дозволяє оптимізувати розмір і енергоспоживання пристрою, оскільки завдяки такому схемотехнічному рішенню виключається необхідність використання великих компонентів або додаткових каскадів для НЧ сигналу.

Частотні характеристики обох сигналів визначаються RC-колами, що підключені до неінвертованого входу ОП і описується відомою наступною формулою [23]:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.1.1.1)$$

при цьому резистори та конденсатори мають мати однакові параметри для забезпечення синхронності.

3.1.2 Підсилювач потужності

Модульований сигнал подається на підсилювач потужності, який підсилює сигнал та забезпечує подачу необхідного рівню струму, який може бути досить високим залежно від кількості витків обмотки котушки індуктивності.

Його основне призначення – підвищення амплітуди сигналу відповідно до його коефіцієнта підсилення та забезпечення необхідного струму для обмотки намагнічування з великою індуктивністю.

Через наявність реактивного опору у котушці індуктивності, амплітуда сигналу може зменшитись

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L \quad (3.1.2.1)$$

X_L – реактивний опір, L – індуктивність, f – частота сигналу

Амплітуда сигналу (A) буде прямо залежати від струму I_L , що протікає через індуктивність та реактивного опору X_L самої індуктивності.

$$A = I_L \cdot X_L \quad (3.1.2.2)$$

Індуктивне навантаження створює значний імпеданс, особливо на високих частотах, що ускладнює роботу генератора сигналу. Підсилювач компенсує цей вплив, підтримуючи стабільний струм і зберігаючи форму сигналу навіть за високого індуктивного опору.

Струм у колі для збереження сигналу визначається за законом Ома для змінного струму:

$$I = \frac{U}{Z} \quad (3.1.2.3)$$

де U – напруга на обмотці, Z – імпеданс обмотки.

Імпеданс у свою чергу обчислюється як

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (3.1.2.4)$$

де R – активний опір системи, X_L - реактивний опір.

Підсилювач також забезпечує швидке встановлення струму в обмотці, мінімізуючи спотворення та втрати сигналу.

$$I(t) = I_{max} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3.1.2.5)$$

де τ – стала часу, яка дорівнює відношенню індуктивності до її опору.

При збільшенні струму підсилювач адаптує сигнал до вимог намагнічуваної обмотки індуктивного сенсора для створення магнітного потоку в обмотці.

Важливою функцією підсилювача є ізоляція генератора від зворотних імпульсів напруги, які можуть виникати через ефект самоіндукції. Це захищає генератор і підвищує надійність системи.

При зміні струму в обмотці виникає зворотна ЕРС через явище самоіндукції, яка може пошкодити генератори сигналу

$$E = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (3.1.2.6)$$

де L – індуктивність, ΔI – зміна струму, Δt – час зміни струму.

Підсилювач підтримує постійний струм через котушку, що мінімізує швидкість змін струму i , відповідно, зменшує величину ЕРС самоіндукції.

Крім того, підсилювач адаптує сигнал до вимог індуктивного датчика, забезпечуючи достатній струм для створення необхідного магнітного потоку в обмотці.

У випадку під'єднання котушок на великій відстані через провідник підсилювач також сприяє зменшенню втрат при передачі сигналу.

3.1.3 Мікроконтролер

Основним компонентом обробки даних та складовою, що забезпечує індикацію результатів і передачу даних, є мікроконтролер. Він оснащений широким набором функціональних можливостей, які дають змогу застосовувати цей пристрій у різноманітних проєктах.

Основні функції мікроконтролера у пристрої моніторингу наведено в таблиці 6.

Таблиця 6 - Функції мікроконтролера

Передача даних на відстань	Wi-Fi модуль
Передача даних по Ethernet	Ethernet модуль
Вимірювання аналогового сигналу	АЦП
Збереження даних	Flash-пам'ять для постійного зберігання даних
	SRAM для тимчасового зберігання даних

Принцип роботи цієї складової системи можна описати наступним чином.

Мікроконтролер вимірює вхідну напругу через АЦП, отримане значення у вигляді 12-бітового коду визначається згідно виразу:

$$U_D = \frac{U \cdot 4095}{U_{ADCmax}}$$

де U_D – цифрове значення (код) напруги;

U_{ADCmax} – максимальна напруга АЦП; U – вхідна напруга.

Отримане значення записується у спеціальну регістрову комірку ADC для подальшої обробки, а також в оперативну пам'ять RAM для подальшого аналізу. Якщо дані необхідно зберігати постійно, вони записуються у Flash-пам'яті.

Передача даних відбувається або через Ethernet або Wi-Fi. Почнемо з першого.

Передача даних через Ethernet-модуль [24]

Ethernet – найпопулярніший протокол кабельних комп'ютерних мереж, що працює на фізичному та канальному рівні мережевої моделі OSI (Середовище зв'язку відкритих систем). Ethernet-модуль працює як міст між мікроконтролером та ethernet-кабелю, через який і передаються сигнали до іншого пристрою, наприклад, комп'ютера.

- На фізичному рівні забезпечується передача цифрових даних через фізичне середовище, перетворюючи їх на електричні сигнали через RJ45 роз'єм. Мікроконтролер використовує RMI для зв'язку з фізичним трансивером PHY – компонентом, який реалізує частину фізичного

рівня Ethernet, забезпечуючи фізичну передачу сигналів через Ethernet-кабель.

- На каналному рівні має відбуватись передача даних між вузлами мережі через фізичний рівень. Передача має відбуватись без помилок, включаючи адресацію отримувача та відправника. Адресація відбувається за допомогою MAC-адреси. На цьому рівні мікроконтролер виконує інкапсуляцію даних. У цьому процесі створюється Ethernet-кадр, де описана MAC-адреса отримувача та відправника, поле корисних даних та трейлер кадру, який використовується для виявлення помилок, що виникли під час передавання.

- Мережевий рівень призначений для маршрутизації даних між різними пристроями в різних мережах. Основною метою є забезпечення пакетів даних від джерела до отримувача, використовуючи логічну адресацію. На відміну від каналного рівня та MAC-адресації, логічна адресація на цьому рівні реалізується через IP-адрес. Ці адреси є ієрархічними й дозволяють ідентифікувати як мережу, так і конкретний пристрій у цій мережі. На цьому рівні працює такий мережевий пристрій, як маршрутизатор, який призначений для організації зв'язку пристроїв.

- Транспортний рівень, четвертий у моделі OSI, відповідає за передачу даних між кінцевими користувачами, забезпечуючи їх надійність, цілісність і послідовність. Він виконує сегментацію даних, розділяючи великі блоки на менші для ефективної передачі. Також цей рівень контролює потік даних, запобігаючи перевантаженню мережі чи пристроїв. Серед основних протоколів цього рівня TCP забезпечує надійну, упорядковану та перевірену на помилки доставку потоку даних між програмами, що працюють на пристроях, які спілкуються через мережу IP, а UDP надає високу швидкість передачі, однак повідомлення надсилаються без узгодження з'єднання і без відстеження даних.

- Сеансовий рівень має на меті установлення, підтримку та закриття логічного сеансу зв'язку між віддаленими процесами: забезпечує керування сеансами взаємодії між абонентами, визначає початок та закінчення сеансів. Часто реалізується через протоколи прикладного рівня, наприклад, протоколом HTTP/HTTPS встановлює та підтримує сеанс між браузером, куди передаються дані та сервером.

- На рівні представлення проходить процес перетворення даних у формат, тобто у системі відправлення він відповідає за перетворення в стандартні формати, які можна передавати. У системі прийому він відповідає за переклад, форматування та доставку інформації для обробки. Якщо мікроконтролер передає дані вимірювання на веб-браузер у форматі HTTPS, він може кодувати їх шифрувальними протоколами TLS/SSL перед відправленням, якщо необхідно.

- Прикладний рівень є найвищим та найближчим до користувача рівнем. Він забезпечує інтерфейс між користувачем та мережею. Це кінцева точка передачі даних, яка представляє собою програми або сервіси, які використовують мережу. На цьому рівні протоколи безпосередньо працюють із даними: HTTP/HTTPS для передачі веб-даних, FTP для передачі файлів.

Передача даних по вбудованому Wi-Fi модулю [24]

- На фізичному рівні передача даних через Wi-Fi мікроконтролером здійснюється шляхом перетворення цифрових даних у бітовий потік, який модулюється методами такими як OFDM і QAM та передається через антену у вигляді радіохвиль на частотах 2,4 ГГц або 5 ГГц. Преамбула забезпечує синхронізацію передачі, а приймач демодулює сигнали для відновлення бітів, використовуючи механізми обробки помилок, такі як FEC і CRC.

- На канальному рівні передача даних через Wi-Fi мікроконтролером базується на використанні унікальної MAC-адреси для ідентифікації пристрою в мережі та управління доступом до середовища передачі за допомогою CSMA/CA . Цей механізм дозволяє уникати колізій у спільному радіочастотному середовищі, перевіряючи доступність каналу перед передачею даних. Wi-Fi кадри формуються з урахуванням адреси відправника і отримувача, типу даних, а також контрольної суми (FCS) для перевірки цілісності. Процес встановлення зв'язку включає аутентифікацію та асоціацію з точкою доступу або іншим вузлом, що забезпечує базовий рівень безпеки та стабільності передачі.

- На мережевому рівні передача даних через Wi-Fi мікроконтролером включає адресацію та маршрутизацію пакетів, де NAT замінює приватну IP-адресу мікроконтролера на публічну адресу маршрутизатора для доступу до Інтернету. Це дозволяє кільком пристроям у локальній мережі використовувати одну публічну адресу, але приховує реальні адреси, ускладнюючи прямий доступ до мікроконтролера без налаштування порт-форвардингу, який дозволяє пристрою або службі в приватній мережі отримувати доступ ззовні мережі, перенаправляючи запити на з'єднання з певного порту публічної IP-адреси маршрутизатора на конкретний пристрій або службу у приватній мережі.

- На транспортному рівні в контексті Wi-Fi передача даних мікроконтролером враховує особливості бездротового середовища, де TCP адаптується до варіацій пропускної здатності і затримок, а UDP дозволяє мінімізувати затримки у реальному часі. TCP автоматично коригує швидкість передачі відповідно до умов Wi-Fi з'єднання, використовуючи механізм управління перевантаженням, тоді як UDP ефективно працює у сценаріях з втратами пакетів, наприклад, у потоковому відео. Обидва протоколи однаково використовують порти для адресації програм, але TCP

більше підходить для нестабільних Wi-Fi з'єднань через свої механізми відновлення пакетів.UDP, TCP – протоколи транспортного рівня.

- На сеансовому рівні передача даних через Wi-Fi мікроконтролером забезпечує встановлення, підтримання і завершення сеансів зв'язку між пристроями. У випадку TCP використовується 3-х етапний процес встановлення з'єднання (3-way handshake), що включає обмін пакетами SYN, SYN-ACK і ACK для підтвердження готовності до зв'язку між клієнтом і сервером. Сеансовий рівень також відповідає за відновлення з'єднання після переривань та управління станом активних сесій, наприклад, у протоколах IoT, таких як MQTT. Завершення з'єднання включає обмін пакетами FIN і ACK, щоб коректно завершити взаємодію без втрати даних. Для UDP, через відсутність явного сеансу, більшість функцій цього рівня реалізується на рівні прикладного протоколу.

- На рівні представлення даних через Wi-Fi мікроконтролер відповідає за форматування, шифрування та стиснення переданих даних для забезпечення сумісності між пристроями. Наприклад, якщо дані передаються у форматі JSON, XML або Protobuf, цей рівень гарантує, що вони правильно закодовані перед передачею. У разі використання HTTPS або інших захищених протоколів, рівень представлення реалізує SSL/TLS, забезпечуючи шифрування переданих даних для захисту від перехоплення.

3.1.4 Індуктивний сенсор

Конструкція сенсора та принцип його роботи детально наведено вище в підрозд. 2.5. Він складається з двох обмоток П-подібних осердь. Перша створює магнітне поле, друга сприймає сигнал у вигляді ЕРС. Сигнал з індикаторної обмотки подається на вхід АЦП для подальшої обробки та передачі даних.

3.1.5 Модуль реального часу

Модулі реального часу - це спеціалізовані пристрої, які забезпечують точне відстеження часу та дати у незалежному від основного джерела живлення режимі, що знадобиться при моніторингу мостової конструкції, оскільки можна буде точно зафіксувати зміни у значеннях даних, що надходять з індуктивного сенсору. Використовуються в системах, де необхідне точне вимірювання та синхронізація часу.

До загальних характеристик цих модулів відносяться:

- Відстеження часу та дати в точності до секунд;
- Модулі, зазвичай, підтримують стандартні протоколи обміну даними, такі як I²C або SPI, що забезпечує інтеграцію з широким спектром мікроконтролерів.

3.1.6. Принцип роботи безпроводної системи моніторингу

Розглянувши ключові вузли системи можна коротко описати її принцип роботи.

Модульований сигнал з каскадів генераторів через підсилювач потужності потрапляє на обмотку намагнічування індуктивного сенсора. Сигнал у вигляді ЕРС зчитується з поверхні мостової конструкції і подається на АЦП мікроконтролера, де конвертується у цифрові дані, які далі передаються на станцію для послідуочого аналізу на предмет наявності деформацій у мостовій конструкції.

Процедура передачі даних від сенсора до станції відбувається за наступним алгоритмом (рис. 34).

Мікроконтролер спочатку намагається встановити з'єднання зі станцією через Ethernet. У разі невдачі він переходить до спроби підключення по безпроводній мережі Wi-Fi. Якщо і цей метод виявляється неуспішним, мікроконтролер повторює цикл спроб підключення, доки одне з підключень не буде встановлене.

Після успішного налаштування з'єднання мікроконтролер переходить до виконання основного циклу. У цьому циклі він зчитує дані з дільника напруги через АЦП, отримує дані з модуля реального часу та передає їх на станцію. У разі втрати з'єднання мікроконтролер знову намагається відновити підключення до станції, щоб продовжити передачу даних.



Рисунок 34 – Узагальнений алгоритм передачі даних з мікроконтролера на станцію.

3.2 Обґрунтування вибору елементної бази для структурних складових системи

Вибір мікроконтролера

При виборі мікроконтролера для обчислювального компоненту системи моніторингу напружень і деформацій мостових конструкцій слід врахувати ключові вимоги до апаратного забезпечення, специфічні для такого проєкту [25, 26]:

- Необхідність передачі даних у режимі реального часу до віддалених носіїв інформації;
- Великий обсяг оперативної пам'яті для зберігання та зчитування даних та проміжних обчислень;
- Великий обсяг основної пам'яті для збереження «прошивки» та основних даних;
- Розширені можливості АЦП для зчитування сигналів.

Таблиця 7 - Характеристики мікроконтролерів

<i>Модель</i>	<i>Процесор</i>	<i>Оперативна пам'ять</i>	<i>Flash-пам'ять</i>	<i>Розрядність ADC</i>	<i>Напруга ADC</i>	<i>Тактова частота</i>
ESP32	Tensilica LX6 (2 ядра)	520 КБ	4-16МБ	12-біт, 18 каналів	0-3,3 В	Макс. 240 МГц
STM32	ARM Cortex-M0/M3/M4/M7	512 КБ	2 МБ	12-біт, 24 канали	0-3,6 В	Макс. 480 МГц
Raspberry Pi Pico W	ARM Cortex-M0+	264 КБ	2 МБ	12-біт, 3 канали	0-3,3 В	Макс. 133 МГц
ESP8266	Tensilica L106	80 КБ	512 КБ-4 МБ	10-біт, 1 канал	0-1 В	Макс. 80/160 МГц
NRF52840	ARM Cortex-M4	256 КБ	1 МБ	12-біт, 8 каналів	0-3,6 В	Макс. 64 МГц
Arduino MKR 1010	ARM Cortex-M0+	32 КБ	256 КБ	10-біт, 7 каналів	0-3,3 В	Макс. 48 МГц

Серед доступних варіантів найбільш підходящими є моделі ESP32 і STM32. ESP32 забезпечує більший обсяг оперативної та флеш-пам'яті, що є важливим для зберігання й обробки великих обсягів даних у реальному часі. STM32, у свою чергу, має найшвидший процесор серед розглянутих варіантів, що дозволяє виконувати складні обчислення з максимальною ефективністю.

Проте, для використання в якості основного мікроконтролера було обрано ESP32 через його вбудований Wi-Fi модуль, який спрощує передачу даних без додаткових апаратних рішень. Для STM32 реалізація Wi-Fi потребує використання додаткового модуля, наприклад, SPWF04SA, що може збільшити складність системи, її вартість та енергоспоживання.

Таким чином, ESP32 є оптимальним вибором для побудови обчислювального компоненту систем моніторингу напружень і деформацій мостових конструкцій, завдяки поєднанню високої продуктивності, великої пам'яті та простоти інтеграції Wi-Fi.

Вибір підсилювача потужності

Підсилювач потужності є важливим компонентом системи, який забезпечує підвищення амплітуди сигналу та подачу необхідного рівня струму для обмотки котушки індуктивності сенсору. Основне завдання підсилювача - стабільна робота з індуктивними навантаженнями, компенсація впливу високого імпедансу та захист генератора сигналу від зворотних імпульсів самоіндукції.

Основними вимогами до підсилювача є:

- Низький вихідний опір;
- Необхідна потужність.

Необхідна потужність обмежена реактивним опором котушки і конкретну кількість витків обмотки намагнічування необхідно визначати експериментальним шляхом. Тобто, якщо реактивний опір котушки змінює

амплітуду сигналу на вході, як це витікає із формули амплітуди сигналу, де ключовою змінною у визначенні реактивного опору є індуктивність, то змінною, яка може також вплинути на амплітуду, є струм, який визначається наступним чином:

$$I^2 = \frac{P}{R} \quad (3.2.1)$$

де P – потужність підсилювача, R – вихідний опір.

На даний момент перевіреним в макеті індуктивного сенсора підсилювачем є модель TDA7052 та його аналоги. Потужність цього підсилювача складає 1 Вт, спотворення складає близько 0,2%, напруга живлення складає (3-18) В. Вихідний опір цього підсилювача складає близько 1 Ом.

Модуль реального часу

Вибір відповідного модуля є важливим, оскільки від його точності, стабільності залежить синхронізація збору даних і можливість їх подальшого аналізу. Серед найбільш поширених RTC-модулів: DS3231, DS1307, PCF8563 та MCP79400, було проведено порівняння аби вибрати найкращий варіант для реалізації поставлених завдань.

Серед критеріїв, за якими обирались модулі були:

- Похибка у відстеженні часу;
- Підтримка стандартів зв'язку для інтеграції з мікроконтролерами;
- Режим автономної роботи

За цими критеріями було сформовано порівняльну таблицю характеристик модулів реального часу.

Таблиця 8 - Характеристики модуля реального часу [27]

Характеристика	DS3231	DS1307	PCF8563	MCP79400
Точність	±2 ppm (± 5 с. / місяць)	±23 ppm (± 1 хв. / місяць)	29 ppm (± 75 с. / місяць)	5ppm (±13 с. / місяць)
Інтерфейс	I ² C (400 кГц)	I ² C (100 кГц)	I ² C (400 кГц)	I ² C (400 кГц)
Споживання в автономному режимі	3 мкА	10 мкА	5 мкА	1,2 мкА

Варто також окремо сказати про температурну залежність точності від температурних умов. Для кварцевих кристалів, на яких працюють модулі реального часу, справедлива функція «перернутої параболи», яка описує залежність частоти кварцу від температури.

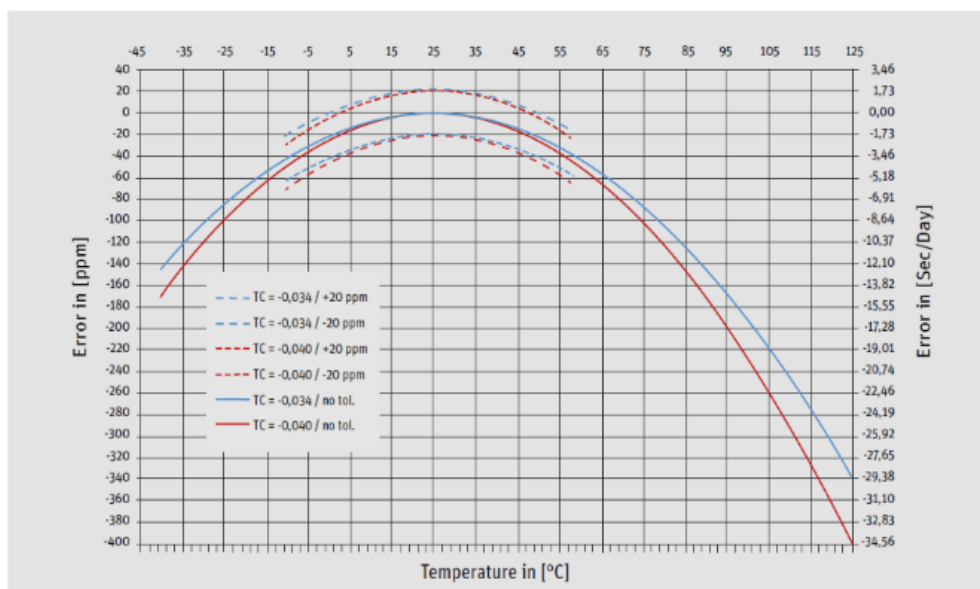


Рисунок 35 – Залежність похибки від температури [28]

З рис. 35 залежності видно, що мінімальне відхилення частоти спостерігається при температурі 25°C. За нижчих або вищих температур частота відхиляється все більше пропорційно до віддалення від цієї

температури. У типовому використанні кварцових резонаторів температурні зміни можуть спричиняти похибку до ± 15 ppm (що еквівалентно приблизно ± 40 секунд на місяць).

Для підвищення точності можна впровадити такі рішення: додати до конструкції модуля термістор, який змінює опір залежно від температури або інтегрувати температурний датчик разом із мікроконтролером, що дозволить реалізувати активну компенсацію похибок.

Модуль DS3231 має перевагу - вбудований термокомпенсований кварцовий генератор, який автоматично регулює частоту залежно від температури. Це робить його точнішим, порівняно з іншими модулями, які потребують додаткових засобів для зменшення похибки [27].

3.3 Макетування окремих вузлів системи і симуляція їх роботи

Індуктивний сенсор

Враховуючи його просту конструкцію, а саме дві обмотки індуктивності навколо П-подібних осердь, макет такого сенсору є відносно простим у створенні.

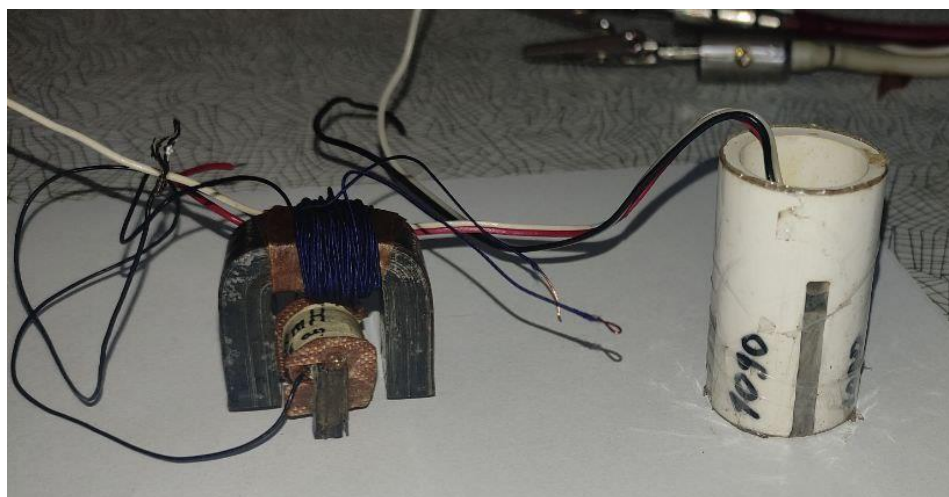


Рисунок 36 – Індуктивний сенсор (зліва - не екранований, справа - екранований)

Екранування створює бар'єр, який запобігає проникненню зовнішніх електромагнітних полів та інших завад у робочу область сенсора. Це дозволяє зменшити рівень шумів і забезпечити стабільність магнітного поля, створюваного сенсором.

Індуктивність намагнічуваної обмотки складає 100 мГн. Індуктивність індикаторної обмотки складає 960 мГн. Макет даного сенсору був випробуваний у лабораторних умовах.

Нижче на рис. 37 показано відображення на осцилографі гармонійних сигналів генераторів високої (10 кГц) та низької частоти (100 Гц).

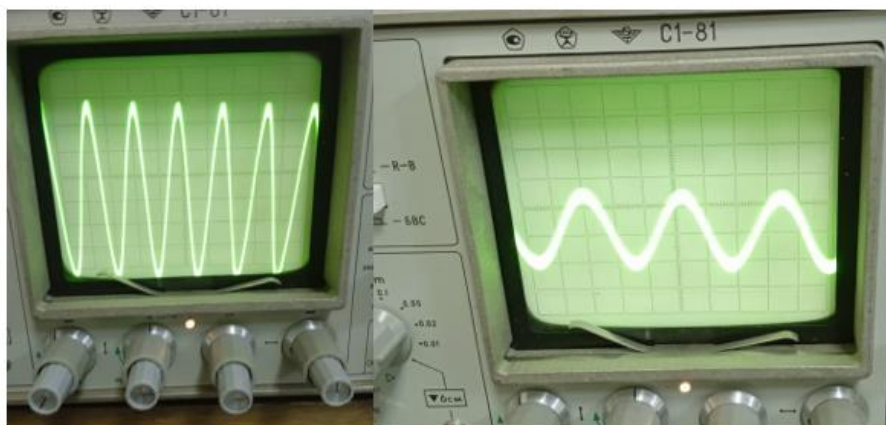


Рисунок 37 – Гармонійні сигнали ВЧ та НЧ генераторів макета

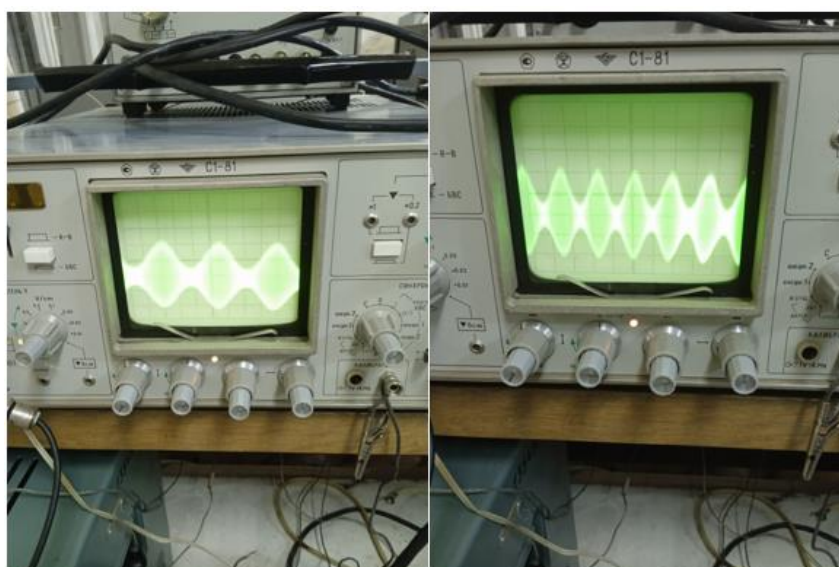


Рисунок 38– Модульований сигнал

Цей сигнал вже поступає на індуктивний сенсор, де в результаті з індикаторної обмотки на пристрої (у нашому випадку вольтметр) можна зафіксувати зміну напруги.



Рисунок 39 – Моніторинг стану деформованої поверхні

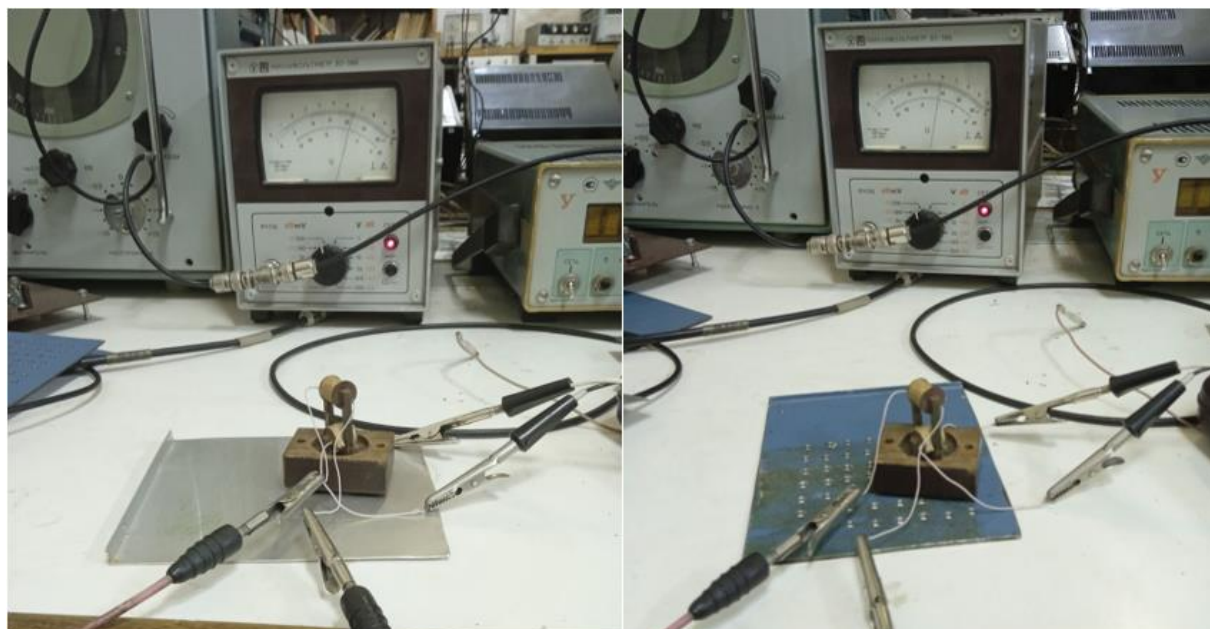


Рисунок 40 – Моніторинг стану недеформованої поверхні

На рисунку 39 можна побачити по показанням вольтметра зміну вихідного сигналу напруги при наявності деформацій з 6 В до 2 В. Така зміна напруги на виході індикаторного сенсору може вказувати на стискаючу природу виявленої деформації. При відсутності деформацій вихідний сигнал не змінюється

3.4 Використання системи на мостовій конструкції

Згідно з джерела обстеження мостових конструкцій планові обстеження мостів, які знаходяться в експлуатації, орієнтовані здебільшого на візуальне виявлення дефектів і не включають методи НК, які потребують використання спеціалізованого обладнання та інструментів. Це означає, що обстеження спрямоване лише на фіксацію дефектів і пошкоджень, які вже проявили себе і можуть бути помітні неозброєним оком або за допомогою мінімальних інструментальних засобів, таких як вимірювальні лінійки чи нівеліри [29].

У рамках такого підходу попереднє обстеження зводиться до ознайомлення з проектною, виконавчою та експлуатаційною документацією, а також загального огляду елементів мосту для виявлення грубих, явних дефектів. Це можуть бути тріщини, крени, осідання, зрушення в плані чи вертикалі, пошкодження бетону, корозія металевих частин чи зсуви опор. Головною метою є складання загального уявлення про стан споруди та визначення необхідності більш глибоких досліджень [29].

Детальні обстеження, що обмежуються лише візуальним оглядом, зосереджуються на описі та документуванні виявлених дефектів. До них входить оцінка ширини тріщин, ступеня корозії, видимого порушення армування залізобетонних елементів, розшарування металу, прогинів чи перекосів опорних частин. Такий підхід також включає фото- чи відеофіксацію пошкоджень для архівування, подальшого аналізу та динамічного спостереження.

Важливо відзначити, що під час таких обстежень не проводяться глибокі діагностичні дослідження, зокрема, неруйнівний контроль. Це значно обмежує можливість виявлення прихованих дефектів, таких як мікротріщини, початкові стадії корозії або внутрішні пошкодження бетону та металу.

Таким чином, планові обстеження зосереджені лише на вже видимих проблемах і не дають повної картини про загальний технічний стан конструкції, що може призвести до недооцінки її реального ресурсу чи потенційної аварійної небезпеки [29].

При цьому ці планові обстеження проводяться з наступною періодичністю

Таблиця 9 – Періодичність планових обстеження мостів

Міст	Вік моста, років				
	1-20	21-40	41-60	61-80	>80
	Періодичність обстеження, років				
Металевий, сталезалізобетонний	5	4	3	2	1
Залізобетонний	7	6	5	3	1



Рисунок 41 – Приклади фрагментів огляду прогонових будов [30]



Рисунок 42 – Фото проведення персоналом огляду мостової конструкції [30]

За результатами обстеження мосту складаються детальні звіти, які містять всю зібрану інформацію про технічний стан конструкції. Ці звіти слугують ключовим документом для оцінки та класифікації експлуатаційного стану окремих елементів мосту, на основі чого приймаються рішення щодо необхідності проведення ремонтних робіт, обмеження руху транспорту та інших заходів.

Враховуючи обмеження таких планових обстежень, які орієнтовані переважно на візуально-оптичне виявлення дефектів, впровадження системи моніторингу напружень та деформацій є новим та актуальним рішенням.

Рекомендації по розміщенню пристрою для моніторингу мостової конструкції

Пристрій системи слід встановлювати у центральній частині прогону ферми або балки. Для балкових мостів ідеальним місцем є нижній пояс ферми в центрі прогону, оскільки саме тут спостерігаються максимальні згинальні моменти, спричинені експлуатаційним навантаженням, зокрема, від проїзду транспортних засобів. Якщо йдеться про аркові мости, рекомендується

розміщення у зонах, де напруження найбільше концентрується, наприклад, у нижній частині арки поблизу її основи.

Обґрунтування вибору такого розташування базується на тому, що центр прогону є критичною точкою для динамічних змін. Це дозволяє реєструвати напруження, які виникають під впливом ваги транспорту та динамічних факторів, таких як гальмування, вібрації та коливання.

Рекомендації з монтажу індуктивного сенсору

- Місце кріплення має бути максимально доступним для обслуговування.
- Для сталевих ферм використовуються клеї на епоксидній основі або болтові з'єднання.
- У випадку залізобетонних конструкцій можливе застосування анкерів, які не спричиняють пошкодження матеріалу.
- Для захисту індуктивного сенсору від впливу навколишнього середовища (волога, пил) рекомендується встановлення герметичних кожухів.

Еталонний індуктивний сенсор слід розташувати у нижній частині однієї з опор мосту, ближче до її основи. В іншому випадку, сенсор можна розмістити у середній частині опори, якщо аналіз покаже, що у цій зоні зміни навантажень ще менші.

Вибір нижньої частини опори обумовлений тим, що ця зона зазнає мінімальних динамічних змін, оскільки основний вплив транспорту розподіляється вище, у прогонах мосту. Нижня частина опори отримує переважно статичні навантаження, які змінюються повільно і не залежать від короткочасних динамічних впливів.

Еталонний індуктивний сенсор слугує базовою точкою порівняння, що дозволяє виключити вплив зовнішніх факторів (температурних змін, атмосферного впливу) на результати вимірювань напружень у найбільш навантажених зонах мосту.

Висновки до розділу 3

Запропоновано нову структурно-функціональну організацію безпроводної системи моніторингу стану мостових конструкцій, відрізняльною особливістю якої є використання в якості первинного вимірювального перетворювача індуктивного сенсора на основі методу ефекту Баркгаузена, що дозволяє оперативно інформувати відповідні служби про ризик виникнення в конкретній локації мостової конструкції аварійних ситуацій.

Це також забезпечує можливість вчасного прийняття рішень щодо проведення ремонтних чи профілактичних робіт, запобігаючи небезпечним ситуаціям і збільшуючи термін безпечної експлуатації мостових конструкцій. Тим самим така система моніторингу не лише дозволяє підвищити безпеку, але й дає змогу оптимізувати витрати на обслуговування та ремонт інфраструктури.

Розглянуто побудову структурних складових системи та обґрунтовано вибір елементної бази для їх реалізації із врахуванням особливостей функціонування системи.

Проведено макетування окремих складових системи, зокрема, індуктивного сенсору, що дало змогу виконати експериментальні дослідження з контролю стану деформованої і недеформованої конструкцій та підтвердити працездатність запропонованих рішень і ефективність використання методу ефекту Баркгаузена.

Розроблено рекомендації по розміщенню індуктивних сенсорів пристроїв безпроводної системи для моніторингу стану мостових конструкцій, які дозволяють відповідно виключити вплив зовнішніх факторів на результати вимірювань напружень у найбільш навантажених зонах мосту та ефективно реєструвати напруження, що виникають під впливом ваги транспорту та динамічних факторів, таких як гальмування, вібрації та коливання.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ

У сучасних умовах забезпечення безпеки та надійності інженерних споруд стає одним із ключових завдань у галузі будівництва та експлуатації інфраструктурних об'єктів. Мости, як складні конструкції, постійно зазнають впливу різних навантажень, що може призводити до накопичення деформацій і пошкоджень. Для ефективного контролю їхнього стану потрібні інноваційні рішення, які забезпечують точний моніторинг та раннє виявлення проблемних ділянок.

Найпоширеніші системи моніторингу використовують різноманітні сенсори та оптичні методи, проте багато з них обмежені точністю та чутливістю до зовнішніх умов, таких як температура, вологість чи освітлення. У зв'язку з цим запропонована система моніторингу напружень і деформацій мостових конструкцій на основі методу ефекту Баркгаузена пропонує новий підхід до діагностики стану споруд.

Ця система дозволяє отримувати дані про напружений стан матеріалів у реальному часі за допомогою спеціальних сенсорів, які реагують на магнітні збурення, викликані деформаціями. У таблиці 10 наведено можливі напрямки використання системи.

Таблиця 10 – Напрямки використання стартап проекту

<i>Апаратні засоби</i>	<i>Сфера застосування</i>	<i>Напрямки застосування</i>
Система моніторингу напружень та деформацій мостових конструкцій	1. Моніторинг мостових споруд	1. Виявлення критичних напружень.
	2. Контроль великих інженерних конструкцій (дами, естакади, вежі)	2. Попередження аварій

<i>Апаратні засоби</i>	<i>Сфера застосування</i>	<i>Напрямки застосування</i>
Система моніторингу напружень та деформацій мостових конструкцій	3. Інфраструктурна безпека	3. Оптимізація ремонтних робіт

Висновки: Система моніторингу мостових конструкцій орієнтована на підвищення ефективності управління інфраструктурою, забезпечуючи точність, швидкодію та економічність впровадження.

Проект розробляється з акцентом на швидкодію та оперативне виявлення критичних станів мостових конструкцій для своєчасного попередження аварійних ситуацій. Дані з сенсорів надходять на локальні станції збору інформації. Основні технологічні параметри рішення наведено в таблиці 11.

Таблиця 11 - Технологічні рішення

<i>Технологічна ідея</i>	<i>Реалізація рішення</i>	<i>Наявність технології</i>
Швидкодія при виявленні критичних станів конструкції	Використання методу ефекту Баркгаузена для фіксації змін у матеріалі в реальному часі.	Наявна
Оперативна передача даних	Надсилання даних на станції збору інформації для подальшої передачі для аналізу	Наявна

Висновки: Головною ідеєю стартап-проекту є створення високоефективної системи моніторингу напружень і деформацій мостових конструкцій. Рішення дозволяє забезпечити підвищення рівня безпеки та своєчасне попередження аварійних ситуацій у важливих інфраструктурних об'єктах.

Унікальні особливості стартап-проєкту, які забезпечують його конкурентну перевагу, наведено в таблиці 12. До технічних характеристик відносяться параметри, що визначають швидкодію, точність і ефективність роботи системи. Економічні характеристики враховують собівартість, витрати на обслуговування та тривалість експлуатації. Показники значущості параметрів W - слабка значущість, N - нейтральна значущість, S - висока значущість.

Таблиця 12 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик

№ n/n	Техніко- економічні характеристики	(потенційні) товари/концепції конкурентів				Значущість параметра
		Проєкт	Конкурен т m1	Конкурент m2	Конкурент m3	
1	Швидкодія (хв)	0,5	1	0,8	1,2	S
2	Інтеграція в інфраструктуру	Висока	Середня	Низька	Середня	S
3	Тех. обслуговування	Є	Є	Нема	Є	N
4	Адаптивність	Висока	Середня	Низька	Середня	S
5	Зручність	Висока	Низька	Висока	Середня	N
6	Собівартість	25	20	18	22	W
7	Захищеність	Є	Є	Є	Є	S

Висновки: порівнюючи конкурентні рішення, розроблена система демонструє кращу ефективність у виявленні критичних станів конструкцій, що суттєво впливає на зниження витрат часу та ресурсів.

Таблиця 13 містить попередню характеристику потенційного ринку стартап-проєкту присвяченого моніторингу напружень та деформацій мостових конструкцій. Аналіз ринку базується на основних показниках його стану та перспектив розвитку.

Таблиця 13 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

<i>№ n/n</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість основних конкурентів	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	1200
3	Динаміка ринку	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Нема
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Присутні
6	Середня норма рентабельності в галузі	30%

Висновки: На основі попередніх характеристик можна дійти висновку, що ринок у сфері виявлення об'єктів перебуває в стадії зростання, а кількість конкурентів наразі недостатня для створення серйозних перешкод у запуску торговельної компанії.

Таблиця 14 - Характеристика потенційних клієнтів

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1	Моніторинг поточного стану мостових конструкцій	1. Державний сектор	1. Оперативність,
		2. Дорожні служби	2. Точність
		3. Приватні підрядники	3. Зручність

Висновки: Реалізація такої системи може знайти застосування як у державному секторі для забезпечення безпеки та довговічності інфраструктури, так і серед приватних підрядників, які прагнуть оптимізувати процеси обслуговування та ремонту мостів

Таблиця 15 - Фактори загрози

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Реакція</i>
1	Технологічний	Недостатня точність	Вдосконалення технології моніторингу
		Недостатня швидкодія системи	
2	Економічний	Економічна нестабільність	Зміна країни виробника
3	Політичний	Політична нестабільність	Зміна постачальників
			Диверсифікація ризиків
4	Конкуренція	Розробка нових технологій та рішень конкурентами	Розробка унікальних переваг

Висновки: Основними загрозами для реалізації проєкту є економічна та політична нестабільність, яка може вплинути на виробництво та постачання компонентів. Для успішного виходу на ринок важливо забезпечити високу якість продукту, оперативно реагувати на зміни ринкових умов і активно комунікувати переваги продукту через маркетингові заходи.

Таблиця 16 - Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Реакція</i>
1	Розширення ринку	Впровадження в інші об'єкти інфраструктури (дамби, тунелі) та поза їх межами.	Розширення послуг у нові галузі, співпраця з партнерами.
2	Розширення функціоналу	Додавання модулів для моніторингу нових параметрів.	Розробка додаткових модулів та інтеграція у систему
3	Індивідуальні замовлення	Адаптація під потреби окремих клієнтів.	Аналіз запитів, створення кастомних рішень.
4	Співпраця з лідерами ринку	Партнерство з провідними компаніями у галузі.	Оцінка переваг і ризиків співпраці.

Висновки: Проект має можливість розширити сферу впливу як в інфраструктурі, так і поза її межами, завдяки гнучкості у функціоналі, адаптації під замовника та партнерству з лідерами ринку.

Таблиця 17 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства</i>
<i>Тип конкуренції – олігополія</i>	Врахування реакцій основних конкурентів	Постійний моніторинг ринку та дій конкурентів
<i>За рівнем конкурентної боротьби – національна</i>	Присутність кількох гравців на ринку	Акцент на якість та зниження собівартості продукту
<i>За галузевою ознакою – багатoproфільна</i>	Система використовується у різних галузях	Розширення цільових ринків
<i>Конкуренція за видами товарів – функціональна</i>	Конкуренція різноманітних моделей моніторингових систем	Вдосконалення функціональності та адаптація до потреб клієнтів
<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства</i>
<i>За характеристиками конкурентних переваг – точність</i>	Конкуренція у точності та швидкості роботи систем	Підвищення точності та швидкодії
<i>За інтенсивністю – технологічна</i>	Конкуренція між функціональністю систем	Розробка нових модулів і рішень

Висновки: Аналіз конкурентного середовища показує, що ринок моніторингу інженерних конструкцій характеризується олігополією з акцентом на багатoproфільність і технологічну інтенсивність. Успіх залежить від здатності підприємства постійно вдосконалювати свою продукцію, особливо в аспектах швидкодії, та адаптувати її до змін ринкових умов.

Таблиця 18 - Характеристика сильних і слабких сторін системи моніторингу напружень і деформацій мостових конструкцій

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ul style="list-style-type: none"> • Висока швидкодія реагування на критичні зміни у структурі конструкцій 	<ul style="list-style-type: none"> • Відсутність впізнаваності бренду
<ul style="list-style-type: none"> • Інноваційний метод моніторингу 	<ul style="list-style-type: none"> • Обмежені фінансові ресурси
<ul style="list-style-type: none"> • Можливість інтеграції з локальними системами збору даних 	<ul style="list-style-type: none"> • Необхідність сертифікації
Можливості	Загрози
<ul style="list-style-type: none"> • Розширення на інші інфраструктурні об'єкти 	<ul style="list-style-type: none"> • Посилення конкуренції
Можливості	Загрози
<ul style="list-style-type: none"> • Партнерства з державними та приватними структурами 	<ul style="list-style-type: none"> • Технічні бар'єри для впровадження
<ul style="list-style-type: none"> • Підвищення попиту на системи безпеки 	<ul style="list-style-type: none"> • Низька поширюваність продукту

Висновки: Проєкт має як сильні, так і слабкі сторони, а також можливості й загрози, які можуть проявитися за умови їх урахування.

Таблиця 19 - Порівняльний аналіз систем моніторингу мостових конструкцій

	<i>Прямі конкуренти</i>	<i>Непрямі конкуренти</i>	<i>Клієнти</i>	<i>Товари-замінники</i>
<i>Складові аналізу</i>	Kistler, Siemens, Advantech	Strestech, Olympus Corporation, General Electric Inspection Technologies	Державний сектор, приватні підрядники	Альтернативні системи НК
<i>Висновки</i>	Для конкуренції з прямими конкурентами слід зосередитися на швидкодії та зниженні витрат	Непрямі конкуренти можуть створити системи моніторингу, але наразі не зацікавлені у цьому	Ключові клієнти орієнтовані на простоту інтеграції та високу надійність	Компанії можуть адаптувати системи НК для моніторингу.

Таблицю 20 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

<i>№ n/n</i>	<i>Фактори конкурентоспроможності</i>	<i>Обґрунтування</i>
1	Собівартість	Низька собівартість сприяє швидкому впровадженню системи
2	Ефективність	Висока ефективність дозволяє точно виявляти критичні стани конструкції
3	Швидкодія	Швидка реакція на небезпечні деформації підвищує безпеку мостів

Висновки: На основі аналізу ринку було визначено ключові фактори конкурентоспроможності системи моніторингу мостових конструкцій. Низька собівартість забезпечує доступність продукту, висока ефективність гарантує точність виявлення пошкоджень, а швидкодія підвищує надійність і безпеку конструкцій, що є критичним для користувачів.

Таблиця 21 - Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Бали 1-20</i>	<i>Рейтинг розроблюваної системи у порівнянні з товарами конкурентів</i>						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Собівартість	18				0			
2	Ефективність	14					+1		
3	Швидкодія	19			-1				

Висновок: Проект демонструє перевагу у швидкодії, проте поступається в ефективності. Тому подальші зусилля слід спрямувати на вдосконалення процесу моніторингу конструкцій.

Таблиця 22 - Альтернативи ринкового впровадження системи моніторингу

<i>№ n/n</i>	<i>Альтернатива ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1	Рекламна кампанія серед державних та приватних замовників	Висока	4-6 місяців

<i>№ n/n</i>	<i>Альтернатива ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
2	Участь у галузевих міжнародних конференціях	Середня	5-6 місяців
3	Співпраця з державними установами через тендери	Висока	8-9 місяців
4	Організація демонстраційних проектів	Середня	12 місяців
5	Використання соціальних медіа для просування	Висока	2-3 місяці

Висновки: З огляду на проведений аналіз, запропоновані альтернативи охоплюють різні підходи до впровадження. Рекламна кампанія та співпраця через тендери забезпечують швидкий доступ до ринку, участь у конференціях допомагає встановити контакти з міжнародними партнерами, а демонстраційні проекти демонструють практичну ефективність системи. Використання соціальних медіа сприяє широкому поширенню інформації про продукт.

Таблиця 23 Вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>№ n/n</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i>	<i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i>	<i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1	Дорожні служби та управління мостовими конструкціями	Висока (Забезпечення безпеки це ключовий пріоритет)	Високий, (значний попит на системи моніторингу)	Середня (наявні конкуренти)	+, зручність інтеграції у процеси обслуговування
2	Приватні підрядники з інфраструктурних проектів	Середня (залежить від бюджету та специфіки замовлення)	Помірний, (залежить від обсягів проектів)	Низька (менша кількість спеціалізованих рішень)	±, можливі узгодження з замовниками

Висновки: Основними цільовими групами є дорожні служби та приватні підрядники. Попит високий, конкуренція помірна. Сегменти

характеризуються готовністю до впровадження рішень, які спрощують обслуговування та забезпечують своєчасний моніторинг стану конструкцій.

Таблиця 24 - Визначення базової стратегії розвитку

<i>№ n/n</i>	<i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції до обраної альтернативи</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>
1	Рекламна кампанія серед дорожніх служб	Стратегія диференціації	Висока швидкодія та точність моніторингу, адаптивність до існуючих систем	Стратегія спеціалізації

Висновки: Базова стратегія розвитку – спеціалізація, орієнтована на дорожні служби як ключовий сегмент ринку. Альтернативна стратегія диференціації спрямована на виділення продукту завдяки його високій швидкодії, точності та зручності впровадження у процеси обслуговування інфраструктури.

Таблиця 25 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>№ n/n</i>	<i>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки</i>
1	Не є «першопрохідцем»	Буде шукати нових споживачів і залучати існуючих через переваги моніторингу	Може використовувати схожі компоненти датчиків і архітектуру аналізу даних	Стратегія наслідування лідера

Висновки: Проект не є «першопрохідцем» і використовує перевірені компоненти, такі як датчики та методи обробки даних. Гнучкість системи дозволяє ефективно адаптуватися до ринку, використовуючи стратегію наслідування лідера, з акцентом на переваги у швидкодії та зручності інтеграції.

Таблиця 26 - Визначення стратегії позиціонування

<i>№ n/n</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проєкту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проєкту (три ключових)</i>
1	Ефективність	Спеціалізація	Оперативність виявлення дефектів	Висока швидкодія роботи
2	Зручність використання	Спеціалізація	Простота інтеграції та експлуатації	Легкість впровадження та налаштування

Висновки: Стратегія позиціонування базується на ефективності та зручності використання, що формує ключові позиції стартап-проєкту - швидкодія та легкість інтеграції. Такий підхід дозволяє виділити проєкт серед конкурентів та задовольнити вимоги цільової аудиторії.

Таблиця 27 – Визначення ключових переваг концепції моніторингової системи

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує система</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1	Моніторинг	Точне визначення критичних станів мостових конструкцій у реальному часі	Вища точність порівняно з існуючими методами моніторингу
2	Швидкодія	Прискорення виявлення деформацій, мінімізація ризику аварій	Зниження витрат часу і ресурсів на обслуговування
3	Зручність інтеграції	Простота впровадження у наявні процеси інфраструктури	Легка інтеграція, мінімізація витрат на адаптацію
4	Масштабованість і гнучкість	Адаптація під різні типи мостів та умов експлуатації	Гнучкість у реагуванні на зміни потреб

Висновки: Ключові переваги моніторингової системи полягають у поєднанні високої ефективності, швидкодії, зручності інтеграції, масштабованості та надійності. Це дозволяє виділитися серед конкурентів та задовольнити потреби інфраструктурних проєктів, забезпечуючи високу операційну ефективність і довготривалу експлуатацію.

Таблиця 28 – Опис трьох рівнів моделі товару

<i>Рівні товару</i>	<i>Сутність та складові</i>		
Товар за задумом	Бездротова система моніторингу напружень та деформацій мостової конструкції у реальному часі з використанням датчиків методу ефекта Баркгаузена		
Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/Е/Ор
	1. Ефективність	М	Тх
	2. Швидкодія	М	Тх
<i>Рівні товару</i>	<i>Сутність та складові</i>		
Товар у реальному виконанні	Якість: Відповідність стандарту ISO 9001:2015		
	Пакування: Надійний захист компонентів системи від механічних пошкоджень, вологи та пилу для забезпечення тривалої експлуатації в умовах інфраструктурних об'єктів.		
Товар із підкріпленням	До продажу - Надання демонстраційних версій програмного забезпечення, технічні вебінари для навчання команди клієнта..		
	Після продажу – Сервісна підтримка, регулярні оновлення програмного забезпечення, можливість розширення апаратних можливостей для адаптації до змінних потреб.		

Висновки: Сформована модель товару акцентує увагу на якості та швидкодії. Система забезпечує оперативне виявлення критичних змін конструкцій, а регулярні оновлення та підтримка підвищують конкурентоспроможність продукту.

Таблиця 29 – Визначення меж встановлення ціни

<i>№ n/n</i>	<i>Рівень цін на товари-замінники</i>	<i>Рівень цін на товари-аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
1	Високий	Середній	Високий	1000-2000 грн.

Висновки: Ціна товару визначається в межах, що відповідають високому рівню доходів цільової аудиторії, забезпечуючи оптимальний баланс між доступністю та якістю.

Таблиця 30 – Формування системи збуту

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
1	Управління мостовими конструкціями, що потребують індивідуального налаштування	Пряма поставка, навчання персоналу, технічна підтримка	Нульового/першого рівня	Прямий збут через власний портал розробника і техпідтримку
2	Приватні підрядники, які шукають гнучкі рішення	Поставка за попереднім замовленням, швидка заміна компонентів	Нульового/першого рівня	Прямий збут через власний портал розробника і техпідтримку

Висновки: Система збуту орієнтована на забезпечення ефективного доступу до продукту для ключових цільових груп. Державним службам надається прямий зв'язок із виробником для підтримки та налаштувань, а приватні підрядники отримують можливість користуватися онлайн-інструментами для швидкого оновлення та адаптації системи до своїх потреб.

Таблиця 31 – Концепція маркетингових комунікацій

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонування</i>	<i>Завдання рекламного повідомлення</i>	<i>Концепція рекламного звернення</i>
1	Потреба у забезпеченні безпеки мостових конструкцій	Соціальні мережі, галузеві конференції, партнерства, E-mail	Надійність, швидкодія, зручність використання	Підкреслення переваг системи для моніторингу та запобігання аварій	Опис функціональності системи з акцентом на її користь для зниження ризиків і забезпечення безпеки
2	Отримання додаткових інструментів для покращення моніторингу	розсилки, демонстрації, технічні семінари	Гнучкість, інтеграція, економічна ефективність	Розповсюдження технічної інформації про можливості продукту	Презентація гнучкості налаштувань системи через реальні приклади використання

Висновки: Основними каналами комунікації для потенційних клієнтів є соціальні мережі, конференції та технічні семінари. Вони дозволяють ефективно демонструвати переваги системи, спрямовуючи зусилля на формування довіри до продукту та його впровадження.

Висновки до розділу 4

Загальний концепт стартап-проєкту чітко сформульовано: система моніторингу мостових конструкцій пропонує високу швидкодію, зручність інтеграції та масштабованість за прийнятною ціною.

Визначено ключових клієнтів у державному та приватному секторах, що свідчить про перспективність ринкового впровадження. Хоча системі може бракувати ширших функцій адаптації під різні типи інфраструктури, це може бути вдосконалено на етапах подальшого розвитку.

Обрані стратегії збуту, включаючи прямий продаж та партнерські канали, сприятимуть побудові ефективної системи розповсюдження. Стратегія спеціалізації дозволить зосередитися на основних перевагах продукту, забезпечуючи конкурентоспроможність і формуючи стійку позицію на ринку.

Проект має всі передумови для успішного впровадження та подальшого розвитку з урахуванням потреб споживачів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальну та важливу науково-прикладну задачу розробки інноваційного рішення для контролю деформацій і напружень мостових конструкцій у вигляді безпроводної системи моніторингу на основі методу ефекту Баркгаузена. Під час виконання дослідження отримано наступні наукові та практичні результати:

1. Проведено аналіз найбільш поширених методів неруйнівного контролю феромагнетиків, що дозволило встановити їх переваги і недоліки, а також обґрунтувати вибір методу ефекту Баркгаузена як базового для подальших досліджень завдяки його чутливості, простоті реалізації, економічності та здатності прогнозувати стан матеріалів.

2. Розглянуто особливості застосування методу ефекту Баркгаузена для моніторингу мостових конструкцій, що дозволило шляхом проведеного аналізу існуючих конструкторських рішень для реалізації зазначеного методу обґрунтувати вибір конструкції індуктивного сенсору як основи для розроблення інтелектуального пристрою з радіомодемом – вузла створюваної безпроводної системи моніторингу.

3. Запропоновано нову структурно-функціональну організацію безпроводної системи контролю стану мостових конструкцій, відрізняльною особливістю якої є використання в якості первинного вимірювального перетворювача індуктивного сенсора на основі методу ефекту Баркгаузена, що дозволяє оперативно інформувати відповідні служби про ризик виникнення в конкретній локації мостової конструкції аварійних ситуацій. Це також забезпечує можливість вчасного прийняття рішень щодо проведення ремонтних чи профілактичних робіт, запобігаючи небезпечним ситуаціям і збільшуючи термін безпечної експлуатації мостових конструкцій. Тим самим

така система моніторингу не лише дозволяє підвищити безпеку, але й дає змогу оптимізувати витрати на обслуговування та ремонт інфраструктури.

4. Розглянуто побудову структурних складових системи та обґрунтовано вибір елементної бази для їх реалізації із врахуванням особливостей функціонування системи. Проведено макетування складової системи - індуктивного сенсора, та виконано експериментальні дослідження, які підтвердили працездатність запропонованих рішень і ефективність використання методу ефекту Баркгаузена для контролю напружень і деформацій у мостових конструкціях.

5. Запропоновано рекомендації щодо розміщення індуктивних сенсорів у системі, які дозволяють мінімізувати вплив зовнішніх факторів, таких як температурні коливання та атмосферні впливи. Це також забезпечує точність реєстрації напружень у найбільш критичних зонах мосту.

6. Розроблено концепцію стартапу для комерційного впровадження системи моніторингу, визначено ключових клієнтів у державному та приватному секторах, сформовано стратегії збуту та розповсюдження. Запропонована система моніторингу забезпечує високу швидкодію, зручність інтеграції та прийнятну ціну, що робить її конкурентоспроможною на ринку. Перспективи вдосконалення системи включають розширення функціональності системи для її адаптації до різних типів інфраструктури та масштабування на ширший ринок.

Отримані результати створюють основу для подальшого розвитку та комерційного впровадження системи моніторингу на основі методу ефекту Баркгаузена.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Неруйнівні методи контролю /[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/45064/1/%D0%9D%D0%95%D0%A0%D0%A3%D0%99%D0%9D%D0%86%D0%92%D0%9D%D0%86%20%D0%9C%D0%95%D0%A2%D0%9E%D0%94%D0%98.pdf>
2. Методи НК сталевих мостів /[Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/figure/Application-of-magnetic-particle-testing-for-steel-bridges-10-20_fig4_355433502
3. Неруйнівний контроль металів та виробів /[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sites.google.com/view/source-list-2dk91/source-5>
4. Методи НК /[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.asnt.org/what-is-nondestructive-testing/methods>
5. Тангенціальний вихрострумний масив /[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/we2c5.pdf>
6. Намагнічувач Y-7 Yoke /[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://magnaflux.com/NA/EN/Products/Magnetic-Particle-Inspection/Equipment/Y-7.htm>
7. Прилад вихрострумного контролю Reddy /[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.eddyfi.com/en/product/reddy-surface-eca-and-mfl>
8. Аналіз шуму Баркгаузена /[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.industrialheating.com/articles/93722-barkhausen-noise-ndi-for-heat-treatment-defects-and-case-depth-analysis>
9. ЗБІРНИК ПРАЦЬ XV Науково-технічної конференції молодих вчених «Електроніка-2024»
10. Ультразвуковий прилад Veo3 /[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sonatest.com/products/flaw-detectors-phased-array/veo3>

11. Метод тотального фокусування /[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.zetec.com/blog/how-full-matrix-capture-refines-total-focusing-method-phased-array-ultrasonic-ndt/>
12. Прилад радіографічного контролю Leonardo DR mini III /[Електронний доступ]. – Режим доступу: <https://www.or-technology.com/en/portable-x-ray-systems-for-radiographic-material-testing.html>
13. Ефект Баркгаузена /[Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Barkhausen_effect
14. Магнітне поле. Характеристики матеріалів в магнітному полі /[Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://stud.com.ua/126186/prirodoznavstvo/magnitne_pole_harakteristiki_materialiv_magnitnomu_poli
15. Мурті В., Шоу Б.А. Evaluation of Tempering Induced Changes in the Hardness Profile of Case-Carburized Steel Using Magnetic Barkhausen Emission Technique. NDT & E International, 2005
16. Туманські С. Handbook of Magnetic Measurements. CRC Press, 2011
17. Тсимбал Є.И. Physics 927. Section 16 Magnetic properties of materials /[Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://unlcms.unl.edu/cas/physics/tsymbal/teaching/SSP-927/Section%2016_Magnetic_Properties_2.pdf
18. Магнітні матеріали /[Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/feeem/10elektrotech_mat%282015%29/p11.html
19. Магнітні матеріали та точка Кюрі /[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://project6237644.tilda.ws/articles/magnitnye-materialy-i-tochka-kyuri>
20. Стенд контролю залишкових напружень СКОН-10. Технічний опис. Інструкція з експлуатації та паспорт

21. Принцип роботи та застосування датчика Баркгаузена /[Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://www.youelectricalguide.com/2022/03/barkhausen-sensor-working-principle-applications.html>
22. Продукція Stresstech /[Електронний ресурс]. Режим доступу:
<https://www.stresstech.com/>
23. Мости Віна /[Електронний ресурс]. – Режим доступу:
https://en.wikipedia.org/wiki/Wien_bridge_oscillator
24. Типи інтернет протоколів /[Електронний ресурс]. – Режим доступу:
https://www.geeksforgeeks.org/types-of-internet-protocols/?ref=header_outind
25. Вибір найкращого мікроконтролера /[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ua.ic-components.com/blog/ESP32-RP2040-and-STM32-Selecting-the-Best-Microcontroller.jsp>
26. Порівняння мікроконтролерів /[Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://www.embedic.com/technology/details/esp32-vs-stm32--which-is-better-and-how-to-choose-2022>
27. Тестування модулів реального часу /[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.switchdoc.com/2014/12/benchmarks-realtime-clocks-ds3231-pcf8563-mcp79400-ds1307/>
28. Вплив температури на чутливість кварцовий кристалів
/[Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://www.jauch.com/blog/en/ask-the-engineer-how-temperature-sensitive-are-quartz-crystals/>
29. Правила обстеження «Мости та труби. Обстеження і випробування»
/[Електронний ресурс]. – Режим доступу:
https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074945954852374060?doc_type=2&

30. Основні положення будівельних норм і нормативних документів щодо обстеження та огляду мостів / [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://drive.google.com/drive/folders/1VXM8hoRqL5Mjl0hvuXDbJub9t78sbw0Z>

Додаток А Копія публікації

УДК 621.787.4

Пристрій моніторингу деформацій та напружень мостових конструкцій на основі методу Баркгаузена

Кирієнко М.О.

Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», проспект Берестейський, 37, Київ, Україна.

***Реферат.** У роботі розглянуто структуру та принцип роботи пристрою моніторингу деформацій та напружень мостових конструкцій на основі методу Баркгаузена. Пристрій здатний вимірювати напруження та деформацію механізмів або цілих металевих конструкцій з можливістю визначення причини виникнення дефектів. Це дає змогу вчасно виявляти потенційні ризики аварій, зменшувати витрати на обслуговування конструкцій та підтримувати високий рівень безпеки. Вибір методу, покладеного в основу реалізації сенсорної частини зазначеного вище пристрою, обумовлений перевагою методу Баркгаузена, який дозволяє виявити не тільки наслідок деформацій у вигляді дефекту, а й причину його виникнення. В подальшому розглянуте технічне рішення може бути базовим для побудови розподіленої безпроводної системи контролю стану, наприклад, масивних мостових конструкцій.*

***Ключові слова:** неруйнівний контроль, метод Баркгаузена, феромагнетик*

Вступ. Важко переоцінити важливість мостових конструкцій у повсякденному житті звичайної людини. Завдяки мостам ми можемо швидко та ефективно переміщуватися з одного місця в інше. Мости слугують невід'ємною частиною транспортних систем, забезпечуючи можливість пересування як для пішоходів, так і для автомобільного та залізничного транспорту. Такі види конструкцій перебувають у щоденній експлуатації, витримуючи значні навантаження та вплив природних факторів. Їхня надійність та довговічність є критично важливими для безпеки та зручності користувачів.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Дефекти змінюють фізичні властивості матеріалів, такі як щільність, електропровідність, магнітна проникність, пружні властивості тощо. Існує значна кількість методів неруйнівного контролю для виявлення дефектів, включаючи акустичний, вихрострумний, радіохвильовий, радіаційний, капілярний, тепловий, електричний та електромагнітний [1]. Однак, більшість із цих методів обмежується дослідженням поверхневого шару матеріалу, що не забезпечує достатньої інформації для прогнозування подальших дій: чи необхідно проводити відновлювальні роботи, чи можлива подальша експлуатація матеріалу. Акустичні методи неруйнівного контролю дозволяють виявляти дефекти на великій глибині, що робить їх придатними для розроблюваного технічного рішення. Цей метод

базується на фіксації параметрів ультразвукової хвилі, яка взаємодіє з об'єктом [2, 3]. Однак, нас більше цікавить причина виникнення дефектів, ніж їх наслідки. Тому метод на основі ефекту Баркгаузена виглядає привабливішим. Ефект виникає при зміні зовнішнього намагнічуючого поля, коли намагніченість матеріалу змінюється стрибкоподібно. При механічних навантаженнях спостерігається аналогічна залежність між кількістю стрибків Баркгаузена та типом навантаження: при розтягненні їх амплітуда та кількість зростають, а при стисненні – зменшуються. Ці стрибки зумовлені змінами розмірів або орієнтації феромагнітних доменів, що дозволяє використовувати ефект як чутливий індикатор змін хімічного та фазового стану феромагнетика для аналізу характеристик виробу [4]. Проте, цьому методу не вистачає глибини проникнення, яка властива акустичному методу, що обмежує його застосування для моніторингу стану масивних частин конструкцій.

Мета роботи полягає у розробленні пристрою моніторингу деформацій та напружень мостових конструкцій, в якому знаходження можливого дефекту та причини його виникнення здійснюється за допомогою сенсора напружено-деформованого стану на основі методу Баркгаузена з можливістю аналізу стану матеріалу та збереження даних вимірювання і передачі їх через Wi-Fi за допомогою вбудованого мікроконтролера.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно виконати наступні завдання дослідження:

- Запропонувати конструкцію індуктивного сенсора напружено-деформованого стану на основі ефекту Баркгаузена;
- Розробити безпровідний вимірювальний пристрій моніторингу деформацій та напружень мостових конструкцій на базі зазначеного вище сенсора.

Основна частина. Індуктивний сенсор, за допомогою якого проводиться вимірювання деформацій і напружень, складається із двох взаємно перпендикулярних магнітопружних П-подібних осердь, на які намотані котушки індуктивності з малою та великою індуктивністю.

Принцип дії сенсора полягає в наступному. Котушка з меншою індуктивністю створює намагніченість матеріалу і працює як випромінювач електромагнітної хвилі, а котушка з більшою індуктивністю функціонує як приймач, зчитуючи зміну індуктивності, пропорційну прикладеній механічній нарузі (розтягування, стиснення). Це відбувається під дією намагнічування матеріалу та орієнтації магнітних доменів у напрямку магнітного поля, а також внаслідок наявності залишкових напружень у феромагнітному матеріалі, які впливають на напрям доменів намагнічування.

Глибина проникнення такого сенсора вимірюється за наступною формулою:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot \sigma \cdot f \cdot \mu_0 \mu}} \quad (1)$$

де σ – електропровідність матеріалу, f – частота сигналу, який подається на сенсор, μ_0 – магнітна константа, μ – відносна магнітна проникність.

Якщо взяти для прикладу сталь, то при частоті сигналу у 30 Гц отримуємо наступний вираз:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot 1,03 \cdot 10^7 \cdot 30 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 200}} = \delta = \frac{1}{\sqrt{8\pi^2 \cdot 1,03 \cdot 6000}} \approx 1,4 \text{ мм глибини проникнення.}$$

Змінною, яка могла б збільшити проникність електромагнітної хвилі, є частота сигналу. При частоті вхідного сигналу у 0,001 Гц глибина проникнення досягне 24,7 см.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot 1,03 \cdot 10^7 \cdot 0,001 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 200}} \approx 24,7 \text{ см}$$

Висновки. Метод Баркгаузена перспективний для розробки пристрою моніторингу деформацій та напружень. Однак для використання на великих об'єктах, таких як мости, потрібно збільшити глибину проникнення, зменшивши частоту сигналу, та розширити зону вимірювання, збільшивши кількість сенсорних вузлів. Це визначає напрямок подальших досліджень, зокрема створення розподіленої безпроводної системи моніторингу стану мостових конструкцій.

Список літератури

1. Неруйнівний контроль /[Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Nondestructive_testing
2. Системи контролю та діагностики /[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://org2.knuba.edu.ua/mod/resource/view.php?id=21637>
3. Дефектологія /[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sites.google.com/view/source-list-2dk91/source-3>
4. Ефект Баркгаузена /[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.stresstech.com/knowledge/non-destructive-testingmethods/barkhausen-noise-analysis/>