

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Приладобудівний факультет  
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

До захисту допущено:  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи  
та технології в приладобудуванні»**

**зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології  
та робототехніка»**

**на тему: «Магнітна система контролю бокових рам візків залізничних  
вагонів.»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) II курсу, групи ПМ-31МП

Рудов Ярослав Дмитрович \_\_\_\_\_

Науковий керівник:

к.т.н. доцент

Баженов Віктор Григорович \_\_\_\_\_

Консультант з розробки стартап-проекту :

д.е.н., проф., завідувач кафедри економічної кібернетики

КПІ ім. Ігоря Сікорського

Бояринова Катерина Олександрівна \_\_\_\_\_

Рецензент:

професор каф. ІВТ, д.т.н., доцент,

Шевченко Костянтин Леонідович \_\_\_\_\_

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

Студент (-ка) \_\_\_\_\_

Київ – 2024 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Приладобудівний факультет**

**Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій КИРИЧУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**

**Рудов Ярослав Дмитрович**

1. Тема дисертації **«Магнітна система контролю бокових рам візків залізничних вагонів»**, науковий керівник дисертації Баженов Віктор Григорович, к.т.н. доцент, затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом дисертації 9 грудня 2024

3. Об'єкт дослідження: процес магнітного контролю бокових рам візків залізничних

4. Вихідні дані: **Ціль контролю:** детектування тріщин (поверхневих, підповерхневих, поперечних, похилих) глибиною до 0,5 мм та ливарних раковин глибиною до 0,5 мм. **Площа контролю:** ~0,6 м<sup>2</sup>

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Розробка системи контролю для візків. Дослідження методів передачі даних у реальному часі для магнітного контролю. Пошук магніторезистивного датчика з чутливістю >0,1  $\mu\text{T}$  (MAG3110). Розробка функціональної та принципової схем. Розробка друкованої плати та її 3D моделі. Моделювання системи контролю в Comsol Multiphysics. Створення ПЗ для обробки, аналізу та візуалізації результатів. 6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу : 4 плакати

7. Орієнтовний перелік публікацій

XX Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні»  
 Рудов Я.Д., студент гр. ПМ-31МП, доц., к.т.н. Баженов В.Г., «СИСТЕМА КОНТРОЛЮ БОКОВИХ РАМ ВІЗКІВ ВАГОНІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МАГНІТНОГО МЕТОДУ»

#### 8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Розробка стартап-проектів	Завідувач кафедри економічної кібернетики, Доктор економічних наук, професор Бояринова Катерина Олександрівна		

#### 9. Дата видачі завдання 1 листопада 2023р.

##### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Формулювання завдання магістерської дисертації	1 тиждень	
2	Огляд сучасних методів неруйнівного контролю та виявлення дефектів	2 тижні	
3	Аналіз можливостей магніторезистивних сенсорів у системах неруйнівного контролю	1 тиждень	
4	Моделювання магнітних полів розсіювання у програмному середовищі Comsol Multiphysics	2 тижні	
5	Розробка макету магнітної системи контролю на основі магніторезистивних сенсорів	2 тижні	
6	Створення програмного забезпечення для обробки та візуалізації даних	2 тижні	
7	Аналіз результатів моделювання	1 тиждень	
8	Підготовка висновків, оформлення пояснювальної записки та презентації	1 тиждень	

Студент

Рудов Ярослав Дмитрович

Науковий керівник

Баженов Віктор Григорович

## РЕФЕРАТ

У магістерській дисертації розроблена та досліджена система магнітного контролю для виявлення дефектів бокових рам візків вантажних вагонів.

### **Актуальність теми :**

Актуальність теми магістерської дисертації полягає у вирішенні важливої задачі підвищення безпеки залізничного транспорту шляхом розробки сучасного автоматизованого методу неруйнівного контролю. Бокові рами візків вантажних вагонів є критичними конструктивними елементами, які піддаються інтенсивним циклічним навантаженням. Це значно підвищує ризик утворення дефектів, таких як тріщини та пори, які можуть стати причиною серйозних аварій, ставлячи під загрозу безпеку перевезень.

Головним недоліком існуючих систем контролю є значна тривалість перевірки, яка в окремих випадках може складати декілька діб. Така тривалість створює серйозні перешкоди для забезпечення безперебійної експлуатації вагонів та своєчасного виконання ремонтних робіт. Крім того, існуючі методи неруйнівного контролю мають низку інших обмежень, зокрема високу вартість обладнання, залежність результатів від кваліфікації оператора та складність виконання перевірки у важкодоступних місцях.

Запропонована автоматизація контролю базується на використанні сенсорів, закріплених на гнучкому немагнітному матеріалі, який охоплює всю область сканування. Це дозволяє повністю автоматизувати процес контролю, забезпечуючи ефективне отримання, зберігання та аналіз протоколів контролю. Такий підхід виключає необхідність застосування дорогих роботів-маніпуляторів для позиціонування датчиків, що значно знижує тривалість перевірки та матеріальні витрати. Одночасно це сприяє підвищенню достовірності результатів контролю, що є критично важливим для забезпечення безпеки залізничного транспорту.

Крім того переваги методу включають:

- **Зменшення фізичного зносу датчиків** завдяки їх статичному розташуванню. Це критично важливо для об'єктів із шорсткою поверхнею, яка може швидко пошкодити сенсори при традиційному способі сканування.
- **Можливість виявлення дефектів на глибших рівнях.** Система дозволяє розміщувати сенсори на відстані до 5 мм від поверхні, що мінімізує контакт із матеріалом і перевершує методи, такі як вихретоковий контроль, у здатності проникати вглиб.

Таким чином, автоматизація на основі статичних сенсорів забезпечує ефективність, чутливість і точність виявлення дефектів, одночасно знижуючи експлуатаційні витрати та продовжуючи термін служби сенсорів, також розширює можливості для роботи з об'єктами складної геометрії. Це робить запропоновану технологію особливо актуальною для підвищення безпеки та економічності обслуговування залізничного транспорту.

**Об'єктом дослідження:** виступає магнітне поле, що збурюється у зоні розташування дефектів. Метою роботи є створення моделі для визначення характеристик полів розсіювання при різних типах та розмірах дефектів, а також побудова макету системи контролю для проведення експериментальних досліджень та порівняння їх результатів із модельними даними.

**Метод дослідження:** базується на математичному моделюванні з використанням методу кінцевих різниць. Бокові рами візків вантажних вагонів мають підвищену ймовірність виникнення дефектів у певних ділянках, що може стати причиною аварійних ситуацій. У роботі проведено математичне моделювання для визначення магнітних полів розсіювання, що виникають у результаті наявності як поверхневих, так і підповерхневих дефектів. На основі отриманих результатів було розроблено макет магнітної системи контролю, що використовує лінійний магнітний матричний перетворювач на основі

магніторезистивних сенсорів. Як інформативний параметр запропоновано використовувати градієнт зміни магнітного поля. У подальших дослідженнях запропоновано використовувати перетворювач, у якому механічне сканування замінене електронним, що реалізується за допомогою матриці магніторезисторів, закріплених на гнучкій основі.

**Наукова новизна:** полягає у створенні інноваційної магнітної системи автоматизованого неруйнівного контролю, яка об'єднує в собі новітні досягнення у галузі магніторезистивних технологій, сучасних мікроконтролерів та кросплатформеного програмного забезпечення. Основні аспекти новизни включають:

- Автоматизація процесу контролю за рахунок використання статичних сенсорів, які фіксують результати у реальному часі, і передачі даних через Bluetooth на кросплатформене програмне забезпечення для візуалізації та аналізу. Такий підхід забезпечує підвищення точності та швидкості контролю і зменшення людського фактору.
- Розробка та впровадження матриці магніторезистивних датчиків, що забезпечує можливість електронного сканування без механічного переміщення датчиків. Це суттєво зменшує знос сенсорів та виключає залежність результатів контролю від стану поверхні об'єкта.

Ключові слова:

МАГНІТНА СИСТЕМА, МАГНІТНИЙ МАТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, МАГНІТОРЕЗИСТОР, ДЕФЕКТ, БОКОВА РАМА, BLUETOOTH.

## ABSTRACT

In the master's thesis, a magnetic inspection system for detecting defects in the side frames of freight car bogies was developed and investigated.

### **Relevance of the topic:**

The relevance of the topic of the master's thesis is to solve the important problem of improving the safety of railway transport by developing a modern automated method of non-destructive testing. The side frames of freight car bogies are critical structural elements that are subjected to intense cyclic loads. This significantly increases the risk of defects such as cracks and pores, which can cause serious accidents and jeopardize transportation safety.

The main disadvantage of existing inspection systems is the long duration of the inspection, which in some cases can be several days. This duration creates serious obstacles to ensuring uninterrupted railcar operation and timely repair work. In addition, existing non-destructive testing methods have a number of other limitations, including the high cost of equipment, the dependence of results on operator qualifications, and the difficulty of performing inspections in hard-to-reach places.

The proposed automation of control is based on the use of sensors mounted on a flexible non-magnetic material that covers the entire scanning area. This allows for full automation of the inspection process, ensuring efficient acquisition, storage and analysis of inspection reports. This approach eliminates the need for expensive robotic manipulators for sensor positioning, which significantly reduces inspection time and material costs. At the same time, it helps to increase the reliability of the inspection results, which is critical for ensuring the safety of railway transport.

Other advantages of the method include:

- Reduced physical wear and tear on sensors due to their static location. This is critical for objects with rough surfaces that can quickly damage sensors with traditional scanning methods.

- Ability to detect defects at deeper levels. The system allows the sensors to be placed up to 5 mm from the surface, which minimizes contact with the material and outperforms methods such as eddy current inspection in their ability to penetrate deeper.

Thus, automation based on static sensors ensures efficiency, sensitivity and accuracy of defect detection, while reducing operating costs and extending sensor life, and expands the ability to work with objects of complex geometry. This makes the proposed technology particularly relevant for improving the safety and efficiency of railway transport maintenance.

**The object of study** is a magnetic field that is perturbed in the area of defects. Purpose: to create a model for determining the characteristics of scattering fields at different types and sizes of defects, as well as to build a model of the control system for conducting experimental studies and comparing their results with model data.

**Research method:** based on mathematical modeling using the finite difference method. The side frames of freight car bogies have an increased probability of defects in certain areas, which can cause accidents. In this paper, we have carried out mathematical modeling to determine the magnetic scattering fields arising from the presence of both surface and subsurface defects. Based on the results obtained, a model of a magnetic control system was developed that uses a linear magnetic matrix transducer based on magnetoresistive sensors. It is proposed to use the gradient of magnetic field change as an informative parameter. In further studies, it is proposed to use a transducer in which mechanical scanning is replaced by electronic scanning, which is realized by means of a matrix of magnetoresistors fixed on a flexible base.

**Scientific novelty:** consists in the creation of an innovative magnetic system of automated non-destructive testing, which combines the latest advances in the field of magnetoresistive technologies, modern microcontrollers and cross-platform software. The main aspects of novelty include:



- Automation of the control process through the use of static sensors that capture results in real time and transmit data via Bluetooth to cross-platform software for visualization and analysis. This approach improves the accuracy and speed of control and reduces the human factor.
- Development and implementation of a matrix of magnetoresistive sensors, which enables electronic scanning without mechanical movement of the sensors. This significantly reduces sensor wear and eliminates the dependence of control results on the state of the object's surface.

**Keywords:**

MAGNETIC SYSTEM, MAGNETIC MATRIX TRANSDUCER, MAGNETORESISTOR, DEFECT, SIDE FRAME, BLUETOOTH.

## Зміст

<b>1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ</b> .....	13
1.1 Основи магнітного неруйнівного контролю .....	15
1.2 Основні параметри петлі магнітного гістерезису.....	21
1.3 Методика контролю бокових рам.....	23
1.4 Порядок проведення ферозондового неруйнівного контролю бокових рам моделі 18-100.....	25
1.5 Порядок проведення магнітопорошкового неруйнівного контролю бокових рам моделі 18-100.....	29
1.6 Критерії бракування бокових рам .....	32
1.7 Аналіз магнітних полів розсіювання, що виникають над дефектами .....	35
1.8 Способи намагнічування та розмагнічування деталей .....	37
1.9 Магнітопорошковий метод неруйнівного контролю .....	41
1.10 Магніторезистивний метод контролю.....	46
1.11 Ферозондовий метод неруйнівного контролю .....	48
1.13 Порівняльний аналіз основних характеристик перетворювачів магнітного поля .....	51
<b>2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ НА ОСНОВІ MMC5603NJ</b> .....	55
2.1 Огляд застосування матричних магнітних систем із магніторезисторами в неруйнівному контролі.....	55
2.2 Структурна схема макету магнітної системи контролю, та її опис.....	60
2.3 Програма обробки та відображення результатів вимірювання.....	63
<b>3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ У ПРОГРАМІ COMSOL MULTIPHYSICS</b> .....	66
3.1 Визначення математичної моделі.....	67
3.2 Макет для експериментального вивчення магнітних збурень.....	68
3.3 Моделювання поверхневих тріщин .....	69
3.4 Моделювання під поверхневих тріщин .....	73
3.5. Моделювання секції бокової рами з підповерхневим дефектом .....	76
<b>4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «МАГНІТНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ БОКОВИХ РАМ ВІЗКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ ВАГОНІВ»</b> .....	79
4.1. Опис ідеї проекту технології.....	79
4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....	87
4.3. Розроблення ринкової стратегії проекту .....	95
4.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	98
4.5. Організація реалізації стартап-проекту "Magnetic Frame Monitor" .....	101
<b>ЛІТЕРАТУРА</b> .....	105

## Вступ

Залізничний транспорт відіграє важливу роль у вантажних перевезеннях в Україні, проте навіть незначні дефекти можуть призвести до серйозних людських і матеріальних втрат. Це створює необхідність у використанні високонадійних методів контролю для інспекції компонентів рухомого складу. Враховуючи, що значна частина залізничного транспорту має значний знос, а фінансів на його оновлення недостатньо, важливо подовжувати терміни експлуатації обладнання, мінімізуючи ризики виникнення аварій. Статистика свідчить, що дефекти найчастіше з'являються в певних елементах конструкції, серед яких бокові рами візків вантажних вагонів потребують особливої уваги.

Найбільш поширеними дефектами бокових рам є тріщини різних напрямків та вм'ятини. Їх утворення пов'язане з втомою матеріалу, оскільки бокові рами піддаються постійним циклічним навантаженням, причому найбільша ймовірність дефектів зосереджена в зонах з максимальним навантаженням. Для діагностики таких дефектів сьогодні використовуються магнітопорошковий, ферозондовий та частково акустико-емісійний методи неруйнівного контролю. Однак ці методи часто вимагають значних витрат часу і залежать від кваліфікації персоналу, що може призводити до похибок.

Бокові рами візків виготовляються методом лиття через складність їх форми, що ускладнює процес контролю. Це обумовлює потребу у використанні складних пристроїв для сканування, щоб забезпечити автоматизацію процесу. Крім того, для намагнічування таких елементів потрібні потужні пристрої, які є дорогими і споживають багато енергії. Відмова від цих пристроїв дозволить значно зекономити на процедурі контролю.

Актуальність дослідження полягає у створенні магнітної системи контролю, яка зможе виявляти як поверхневі, так і підповерхневі дефекти з

високою точністю і чутливістю. Важливо також пришвидшити процес перевірки, забезпечивши повне покриття складних геометричних форм бокових рам.

Об'єктом дослідження є процес магнітного контролю магнітних полів збурення, а предметом – розробка макету магнітної системи контролю для бокових рам візків. Основний метод дослідження – математичне моделювання методом кінцевих різниць.

У цій магістерській роботі виконано аналіз дефектів, характерних для бокових рам, і визначено оптимальний метод їх контролю. На основі моделювання полів збурення при наявності різних типів дефектів було створено макет магнітної системи з використанням лінійного матричного перетворювача на базі магніторезисторів.

Це дозволило підвищити чутливість та точність виявлення дефектів, поступово відмовляючись від складних пристроїв намагнічування на користь локальних. Механічне сканування було замінено електронним опитуванням датчиків, а інформативним параметром обрано градієнт зміни напруженості магнітного поля.

Серія експериментів, проведених з використанням створеного макету, підтвердила результати моделювання. Запропонована магнітна система контролю підвищує надійність та точність діагностики.

## 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ

Бокові рами візків вантажних вагонів піддаються систематичному неруйнівному контролю з метою виявлення дефектів, що можуть виникнути через експлуатаційні навантаження. Для цього використовуються методи магнітного контролю, такі як магнітопорошковий і ферозондовий, а в деяких випадках також акустико-емісійний метод. Магнітні методи, які є одними з найпоширеніших у галузі неруйнівного контролю, забезпечують можливість перевірки більшої частини продукції, що виготовляється з феромагнітних матеріалів.

У цьому розділі буде детально розглянуто сутність магнітного неруйнівного контролю, особливості його застосування, а також проведено порівняльний аналіз різних методів, зокрема магнітопорошкового і ферозондового. Будуть визначені їхні основні переваги та недоліки, що дозволить оцінити ефективність кожного методу у різних ситуаціях. Оскільки магнітні методи мають свої обмеження, особлива увага приділяється вибору оптимальної методики для конкретних завдань.

Магнітний неруйнівний контроль базується на здатності магнітного поля взаємодіяти з дефектами у матеріалі, створюючи при цьому поля розсіювання. Важливо розуміти фізичну природу цих полів розсіювання, адже вони виникають там, де структура матеріалу порушена через наявність тріщин, пустот або інших дефектів. Поля розсіювання магнітного поля дозволяють точно ідентифікувати розташування дефектів, їхню глибину і орієнтацію.

Оскільки не всі дефекти мають однакову ймовірність виникнення по всій площині об'єкта, важливо враховувати специфіку кожної ділянки. Деякі зони бокових рам візків є більш вразливими через високі механічні навантаження,

тому контроль цих ділянок повинен бути особливо ретельним. Для цього, на основі керівних документів та нормативних актів, встановлюються порогові значення, які визначають допустимість використання бокових рам залежно від наявності і розмірів виявлених дефектів.

При аналізі об'єкта контролю враховуються такі фактори, як матеріал виготовлення, геометричні особливості рам і характер експлуатаційних навантажень. Наприклад, зони з гострими кутами, переходами та ділянками максимальних згинальних моментів є більш схильними до утворення тріщин. Це зумовлює необхідність використання складних методик контролю для забезпечення високої точності виявлення навіть найдрібніших дефектів. Зокрема, магнітопорошковий метод є особливо ефективним для виявлення поверхневих тріщин, тоді як ферозондовий метод дозволяє ідентифікувати підповерхневі дефекти.

Магнітопорошковий метод передбачає нанесення на поверхню деталі порошку, що реагує на аномалії магнітного поля, які утворюються над дефектами. Це дозволяє чітко ідентифікувати місця розташування дефектів. Водночас ферозондовий метод базується на використанні спеціалізованих датчиків, які реєструють зміну інтенсивності магнітного поля при проходженні над ділянками з порушенням суцільності матеріалу.

Для забезпечення високої ефективності магнітного контролю, необхідно враховувати можливі джерела похибок, такі як неоднорідності структури матеріалу, зовнішні магнітні впливи або залишкові магнітні поля. З цією метою проводиться калібрування приладів і використання стандартних зразків для контролю точності вимірювань. Крім того, методика контролю передбачає проведення повторних перевірок у випадках, коли результати виявлення дефектів є сумнівними або погано інтерпретованими.

Таким чином, проведення магнітного неруйнівного контролю бокових рам вантажних вагонів є важливим етапом у забезпеченні їх безпечної експлуатації. Оптимізація методів контролю, вибір адекватних параметрів намагнічування та правильна інтерпретація результатів дозволяють значно підвищити точність діагностики і знизити ризики виникнення аварій.

### **1.1 Основи магнітного неруйнівного контролю**

Магнітний неруйнівний контроль зазвичай застосовується для перевірки якості виробів, виготовлених з феромагнітних матеріалів, які здатні змінювати свої магнітні властивості під впливом зовнішнього магнітного поля. Цей метод передбачає обов'язкове намагнічування об'єкта, тобто його розміщення у магнітному полі, для виявлення можливих дефектів. Інформація про стан матеріалу може бути отримана як з його поверхневих шарів, так і з глибших внутрішніх структур, залежно від обраного способу контролю.

Залежно від конкретних завдань неруйнівного контролю (НК), типу матеріалу, який перевіряється, та необхідної продуктивності процесу можуть використовуватися різні інформативні параметри. Серед найбільш поширених параметрів, що застосовуються для оцінки стану матеріалу, можна виділити такі: коерцитивна сила, намагніченість, магнітна індукція (включаючи залишкову індукцію), магнітна проникність, напруженість магнітного поля та ефект Баркгаузена. Ці параметри дозволяють оцінити магнітні властивості матеріалу та виявити можливі дефекти.

Методи магнітного неруйнівного контролю можна класифікувати за способом отримання первинної інформації. Серед основних методів виділяють: магнітопорошковий (МП), магнітографічний (МГ), ферозондовий (ФЗ), заснований на використанні ефекту Хола (ЕХ), індукційний (І), магніторезистивний (МР) та інші. Кожен із цих методів має свої особливості і

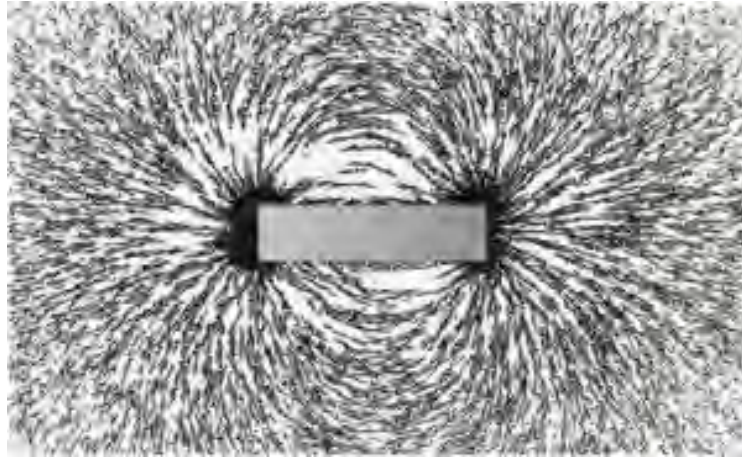
переваги, що дозволяє обирати оптимальний підхід для виявлення дефектів залежно від конкретних умов і типу матеріалу.

Магнітні методи неруйнівного контролю дозволяють виявляти як поверхневі, так і неглибокі підповерхневі дефекти в матеріалі. Для розуміння принципів дії таких методів необхідно розглянути фізичну природу магнітних полів. Джерелом магнітного поля є рухомі електричні заряди (струми), яке виникає в просторі навколо провідника зі струмом. Магнітне поле, створюване постійними магнітами, є результатом мікрострумів всередині речовини, відповідно до теореми Ампера. Відмінною особливістю магнітного поля є те, що воно діє виключно на рухомі заряди.

Основні фізичні властивості магнітного поля можна продемонструвати, проводячи експерименти з намагніченими брусками. Коли магнітний брусок підвішується в повітрі, один його кінець буде вказувати на географічну північ, а інший – на південь, що відповідає північному та південному полюсам магніту. При взаємодії двох магнітів спостерігається притягування, якщо їхні полюси різні, і відштовхування – якщо полюси однакові.

Ці експерименти підтверджують існування силового поля, яке оточує намагнічені об'єкти. Це поле є невидимим, проте його дія відчувається в трьох просторових напрямках. Двовимірне зображення магнітного поля можна отримати, якщо розмістити магнітний брусок на світлому папері і розсипати навколо дрібні феромагнітні частинки. Частинки зосереджуються вздовж силових ліній поля, формуючи зображення, показане на рис. 1.1.





*Рис. 1.1 Силві лінії магнітного поля*

Лінії на зображенні відповідають силовим лініям магнітного поля, які ще називають лініями магнітного потоку. Вони проходять через частини матеріалу без дефектів і не перетинаються між собою. Кожна з цих ліній утворює замкнену петлю, яка проходить крізь магніт. При використанні терміна "потік" мається на увазі напрямок поширення, який приймається за позитивний. За позитивний напрямок обирають напрямок від північного полюсу магніту, де силові лінії виходять, до південного полюсу, куди вони входять, проходячи через повітря.

Для характеристики магнітного поля вводять векторну величину – магнітну індукцію  $B$ , яка аналогічна напруженості електричного поля  $E$ . Магнітна індукція описує сили, що діють на струми або рухомі заряди, що перебувають у магнітному полі. У кожній точці простору можна визначити вектор магнітної індукції  $B$ , який вказує як напрямок, так і величину дії магнітного поля.

Для кількісної оцінки необхідно не тільки знати напрямок поширення вектора магнітної індукції, а й визначити його модуль. Модуль обчислюється через силу, що діє на струм у магнітному полі, за допомогою закону Ампера, який виражається формулою:

$$F \sim I \Delta l \sin \lambda \quad (1.1)$$

де  $I$  — сила струму,  $\Delta l$  — елемент довжини провідника, а  $\lambda$  — кут між напрямком струму та лініями магнітного поля.

Сила Ампера в загальному випадку виражається наступним співвідношенням, відомим як закон Ампера:

$$F = IB \Delta l \sin \lambda \quad (1.2)$$

Де  $I$  — сила струму,  $B$  — магнітна індукція,  $\Delta l$  — довжина провідника, а  $\lambda$  — кут між напрямком струму та магнітним полем. Сила Ампера завжди спрямована перпендикулярно до вектора магнітної індукції  $B$  та напрямку струму  $I$ , що тече через провідник.

Експериментальні дослідження показали, що всі матеріали в певній мірі володіють магнітними властивостями. Фізична величина, що вказує, наскільки магнітна індукція  $B$  у конкретному середовищі відрізняється від індукції  $B_0$  у вакуумі, називається магнітною проникністю  $\mu$ :

$$\mu = \frac{B}{B_0} \quad (1.3)$$

Магнітні властивості матеріалів визначаються характеристиками атомів та елементарних частинок, таких як електрони, протони і нейтрони, що складають ці матеріали. При цьому основний внесок у магнітні властивості забезпечують електрони, оскільки їхній магнітний вплив значно перевищує вплив протонів і нейтронів. Однією з ключових характеристик електронів є наявність як електричного, так і магнітного поля. Це магнітне поле, яке утворюється внаслідок спінового руху електронів, називається спіновим магнітним моментом. Додатково, магнітне поле створюється орбітальним рухом електронів навколо ядра атома. Сукупність спінових і орбітальних полів визначає загальні магнітні властивості матеріалу.

Залежно від магнітних характеристик, матеріали поділяються на три основні типи: парамагнетики, діамагнетики і феромагнетики. Діамагнетики характеризуються невеликою магнітною проникністю, значення якої трохи відрізняється від одиниці, і при намагнічуванні вони створюють поле, спрямоване протилежно до зовнішнього поля. Парамагнетики, навпаки, утворюють магнітне поле, орієнтоване у напрямку прикладеного поля.

Феромагнетики мають властивість сильно намагнічуватися під дією зовнішнього магнітного поля, і їх магнітна проникність може досягати значень від  $10^2$ - $10^5$ . Однак при нагріванні до певної температури, відомої як температура Кюрі, феромагнітні матеріали втрачають свої властивості і переходять у парамагнітний стан.

Феромагнетики, за відсутності зовнішнього магнітного поля, складаються з областей, які називаються доменами. Кожна з цих областей є намагніченою до стану насичення. Межі між доменами залежать від типу матеріалу і можуть мати різні розміри, наприклад, для заліза їхній типовий розмір становить близько  $10^{-7}$  метрів. У загальному випадку, сумарний магнітний момент матеріалу дорівнює нулю через випадкове розташування напрямків намагніченості доменів.

При наявності зовнішнього магнітного поля відбувається зміна орієнтації магнітних моментів доменів у напрямку поля. Це призводить до формування сумарного магнітного моменту, що відрізняється від нуля. Залежність між намагніченістю  $M$  (магнітним моментом на одиницю об'єму) і прикладеним магнітним полем  $H$  описується кривою намагнічування. При цьому намагніченість не завжди є лінійною функцією від величини магнітного поля, але пов'язана з ним співвідношенням:  $M = kH$  ( $B = \mu_0 H$ ), де  $\mu_0$  - абсолютна магнітна проникність.

Оскільки багато наукових джерел використовують систему одиниць СГСМ, у системі СІ зручніше користуватися відносною магнітною проникністю, визначеною як:

$$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0} \quad 1.4$$

$$\text{де } \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}.$$

Форма кривої намагнічування залежить від початкового стану матеріалу, і якщо він відповідає стану розмагнічування, то крива називається початковою або основною.

## 1.2 Основні параметри петлі магнітного гістерезису

Після досягнення феромагнетиком стану технічного насичення зменшення магнітного поля супроводжується спадом намагніченості (індукції), проте цей процес відбувається зі зсувом щодо вихідної кривої намагнічування. Навіть коли поле стає рівним нулю, магнітна індукція зберігає певне значення, яке називають залишковою намагніченістю ( $B_r$ ). Якщо прикладати магнітне поле в протилежному напрямку, залишкова намагніченість починає зменшуватися і при певному значенні зворотного поля стає рівною нулю. Це значення поля називається коерцитивною силою ( $H_c$ ).

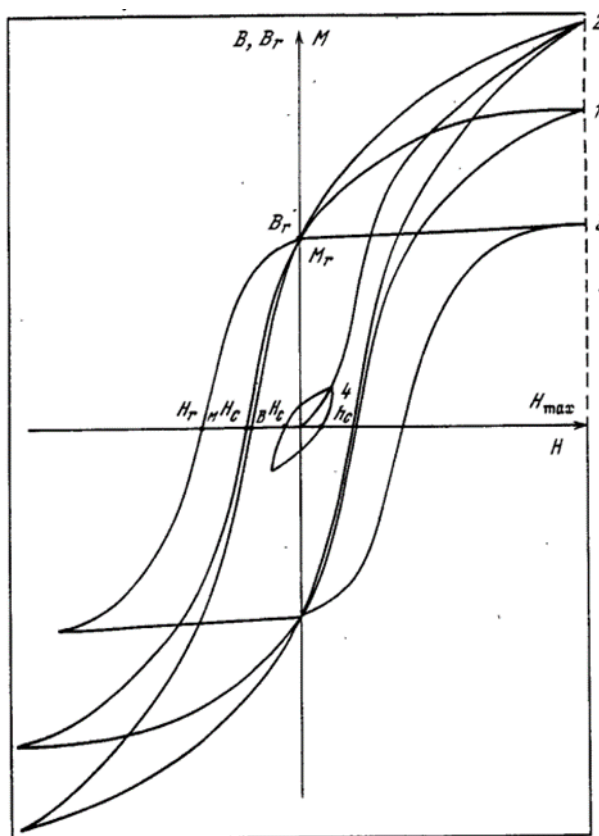
Коерцитивну силу можна визначати як для намагніченості, так і для індукції, залежно від методу оцінки. Феромагнетики з високою крутизною кривої намагнічування мають невелику коерцитивну силу, а різниця між коерцитивними силами для намагніченості та індукції є незначною. Натомість, для матеріалів з високою коерцитивною силою і пологою кривою намагнічування ця різниця стає більш суттєвою, що слід враховувати під час контролю магнітних характеристик.

При підвищенні зворотного поля індукція продовжує зменшуватися до досягнення технічного насичення феромагнетика в протилежному напрямку ( $-M_s$ ). Якщо напрямок поля знову змінити на протилежний, відбувається повторний процес намагнічування, який утворює замкнену криву, що називається статичною петлею магнітного гістерезису.

Якщо після завершення першого циклу магнітного гістерезису виконати ще один цикл за тих же умов, змінюючи поле від  $+H_{max}$  до  $-H_{max}$ , отримані значення індукції  $+B_{max}$  і  $-B_{max}$  можуть відрізнитися від значень, що спостерігалися під час початкового циклу. Це свідчить про нестабільність петлі гістерезису протягом декількох перших циклів. Зазвичай, для досягнення

стабільності необхідно провести близько 10-12 циклів, хоча для деяких матеріалів може знадобитися більше.

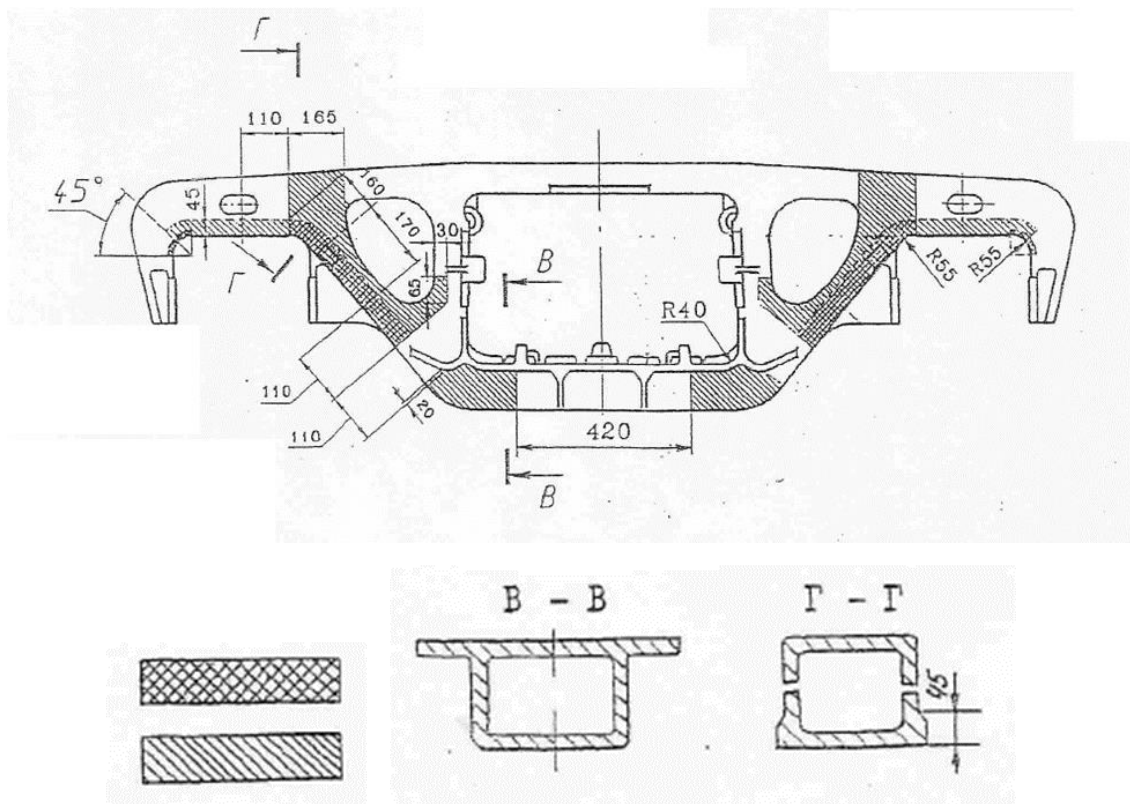
Після досягнення стабільного стану, індукція змінюватиметься вздовж тієї ж замкненої кривої. Для забезпечення встановленого циклу магнітного гістерезису зазвичай проводять багаторазову комутацію магнітного поля від  $+H_{\max}$  до  $-H_{\max}$ . Лише після цього переходять до вимірювання параметрів петлі магнітного гістерезису.



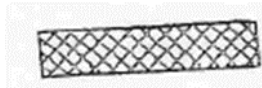
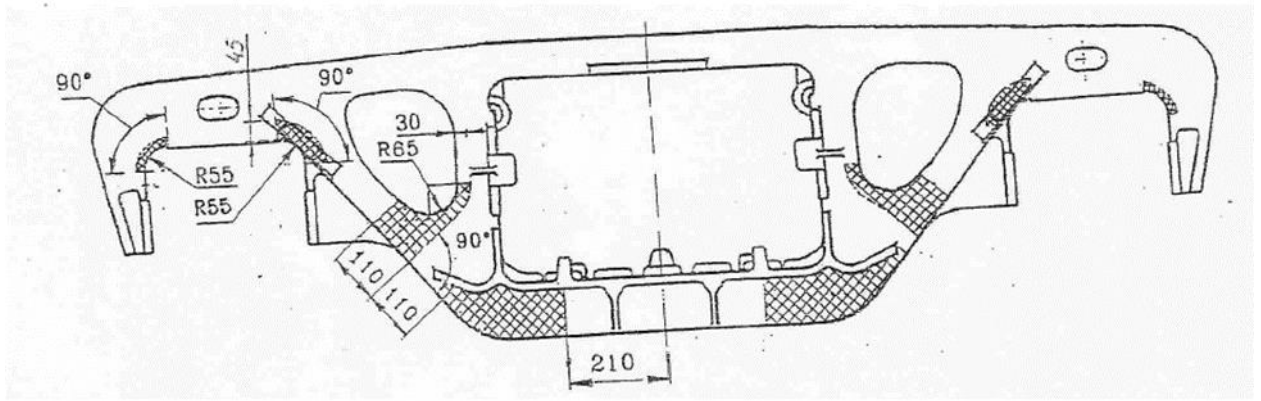
На рисунку 1.2 показано граничні петлі магнітного гістерезису під час намагнічування (1), індукції (2), залишкової індукції (3) і часткового циклу гістерезису (4).

### 1.3 Методика контролю бокових рам

В якості об'єкта контролю в даній магістерській роботі розглядаються бокові рами візків вантажних вагонів моделі 18-100, які зображені на відповідних рисунках [6-8]. На цих рисунках затемнені області вказують на зони, де проводиться неруйнівний контроль. Варто зазначити, що зона В охоплює ті частини конструкції, де обов'язкове проведення контролю з огляду на високу ймовірність виникнення дефектів саме в цих місцях.

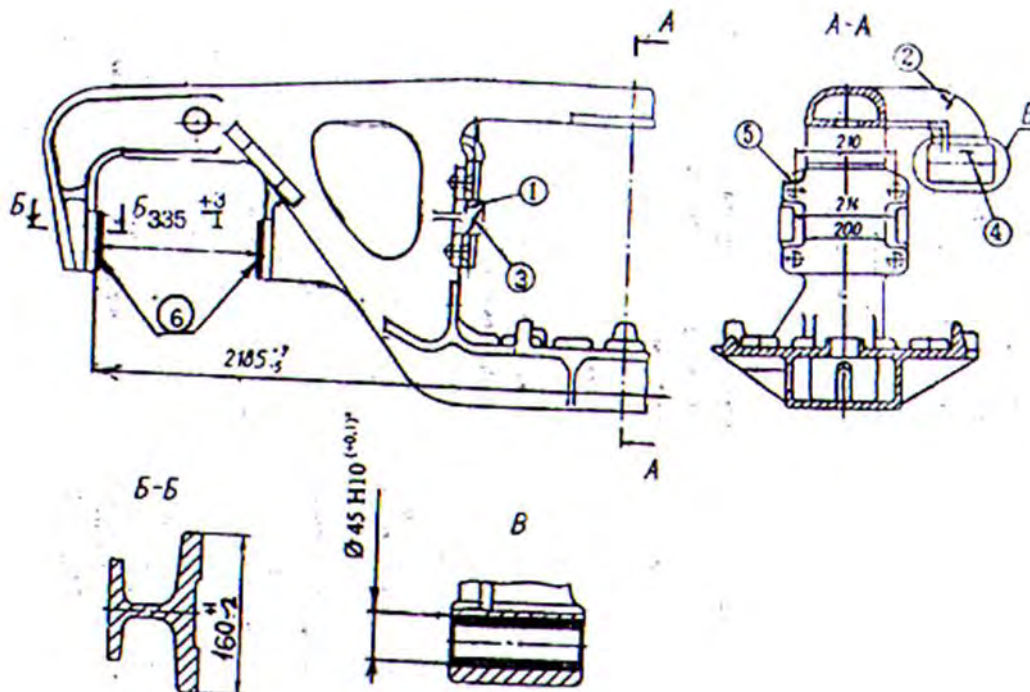


*Рисунок 1.3 Бокова рама. зона А та Б*



- зона обов'язкового проведення неруйнівного контролю

На рисунку 1.4 зображено бокову раму візка, де виділені зони обов'язкового проведення неруйнівного контролю. Вони позначають ділянки, де найчастіше виникають дефекти. Серед найбільш поширених є поверхневі тріщини різної орієнтації, які зазвичай утворюються у зонах, що зазнають максимальних циклічних навантажень, таких як буртики, місця кріплення фрикційних планок і напрямні.



На рисунку 1.5 представлені типові дефекти бокових рам моделі 18-100.



Вони включають:

1. Тріщини напрямляючого буртика.
2. Тріщини буртика.
3. Відкол напрямляючого буртика.
4. Повздовжні тріщини у стінках прилива валка підкладання.
5. Відкол вушок у місцях кріплення фрикційних планок.
6. Зношування поверхонь напрямляючих.

Ці дефекти характерні для зон, що піддаються максимальним навантаженням, і потребують регулярного контролю для забезпечення безпеки експлуатації.

#### **1.4 Порядок проведення ферозондового неруйнівного контролю бокових рам моделі 18-100**

Перед проведенням ферозондового контролю деталь спочатку намагнічують, після чого виконують контроль на ділянках, зазначених як обов'язкові на рисунку 1.4. Таким чином, перевірка здійснюється в залишковому магнітному полі. Намагнічування може проводитися як на стаціонарних установках, так і за допомогою переносних пристроїв. Після цього розмагнічування не є необхідним.

Зазвичай, для намагнічування використовують пристрій МСН 34, а для ферозондового контролю — дефектоскопи Ф-215.1, Ф-205 та ДФ-201.1 А.

Під час проведення ферозондового контролю дефектоскоп розміщують над поверхнею деталі, що перевіряється, і плавно переміщують по лініях сканування. При цьому важливо тримати дефектоскоп притиснутим до поверхні з мінімальним тиском і орієнтувати його так, щоб нормальна вісь приладу була перпендикулярна до поверхні, а поздовжня складова відповідала напрямку ліній магнітного поля.

Сканування повинно проводитися рівномірно, без перекосів або зривів приладу з поверхні деталі. Відстань між лініями сканування і швидкість їх проходження регламентуються нормативною документацією і не повинні перевищувати 8 см/с. Лінії сканування зазвичай позначаються пунктиром на схемі контролю.

У разі виявлення дефекту необхідно провести повторний огляд з метою уточнення його місця розташування. Найсильніший сигнал від дефекту вказує на точне місце, яке слід позначити для подальшого аналізу. Після виявлення дефекту рекомендується очищення зони від забруднень і проведення візуального огляду.

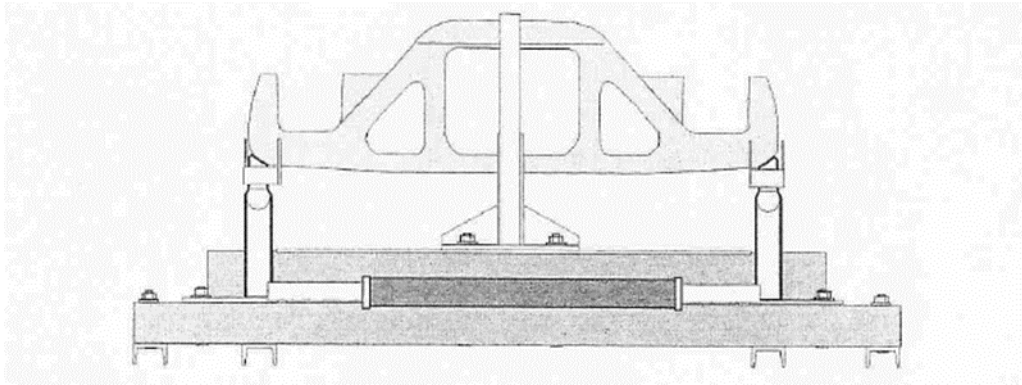
Якщо дефект не вдається усунути шляхом обробки, проводиться зачистка за допомогою шліфувальної машинки до глибини не більше 2 мм. Рівень сигналу від дефекту має бути нижчим за фонове значення градієнта магнітного поля, яке не повинно перевищувати 5000–8500 А/м<sup>2</sup> залежно від типу намагнічуючого пристрою.

Якщо після повторної зачистки сигнал від дефекту залишається меншим за порогове значення, але перевищує фоновий рівень градієнта напруженості магнітного поля, необхідно провести магнітопорошковий неруйнівний контроль для остаточного рішення щодо стану деталі.

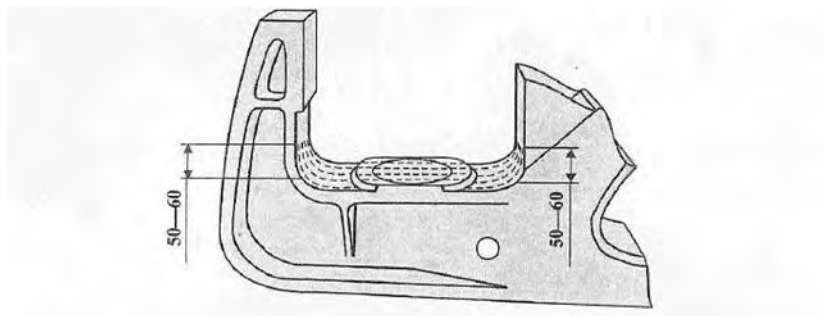
Процес ферозондового неруйнівного контролю включає такі етапи:

1. Підготовка ферозондового дефектоскопа до роботи.
2. Калібрування на стандартному зразку підприємства (наприклад, СОП-НО-28), де градієнт напруженості поля над дефектом має значення  $6500 \pm 325$  А/м<sup>2</sup>.
3. Встановлення рами на намагнічуючий прилад типу МСН 34.

4. Очищення обов'язкових зон контролю до рівня шорсткості поверхні  $R_z$  160.



На рисунку 1.6 показано розміщення бокової рами на приладі МСН 34 для проведення контролю.



*Рис. 1.7 контроль кутів буксовоо прорізу*

Сканування зони внутрішнього та зовнішнього кутів, а також опорної частини буксового прорізу слід виконувати з кроком 5-8 мм. Напрямки сканування вказані пунктирними лініями на рисунку 1.7, що дозволяє забезпечити ефективний контроль цих ділянок для виявлення можливих дефектів.

Сканування потрібно проводити з кроком 5-8 мм для кромки горизонтальної полицки, самої горизонтальної полицки, а також вертикальної стінки. Напрямки сканування вказані пунктирними лініями, як показано на рисунку 1.8.

*Рис. 1.8 Контроль зон, що прилягають до буксового прорізу*

Сканування похилого поясу бокової рами слід виконувати з кроком 5-8 мм, як показано на рисунку 1.9, де напрямки сканування позначені пунктирними лініями. Також сканування скосу внутрішніх технологічних вікон проводиться з таким же кроком для забезпечення повного контролю зазначених зон.

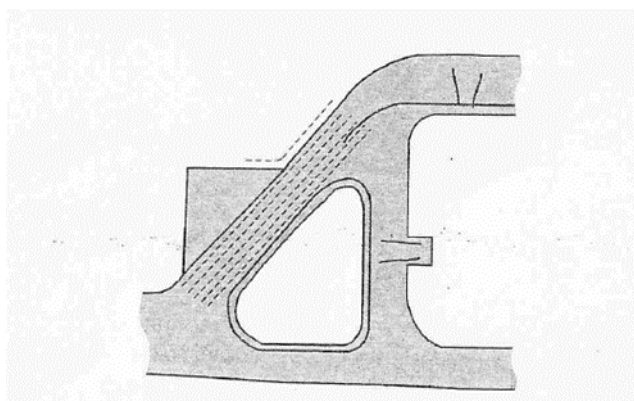


Рис. 1.9 Контроль похилого поясу

Сканування скосу внутрішніх технологічних вікон слід виконувати з кроком 5-8 мм, як показано на рисунку 1.10, де напрямки сканування позначені пунктирними лініями. Це забезпечить ретельний контроль і допоможе виявити можливі дефекти в цих зонах.

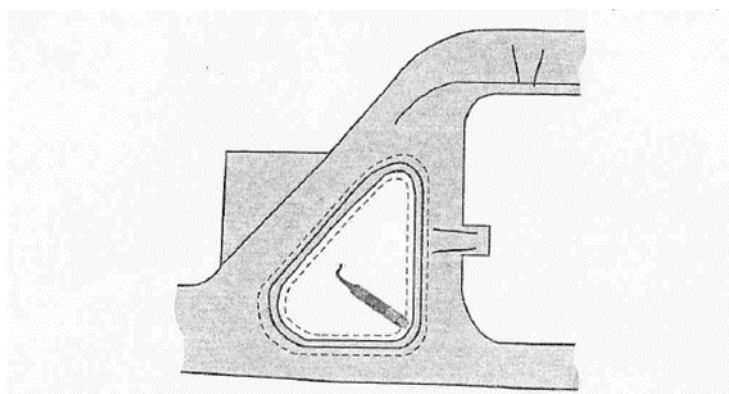


Рис. 1.10 Контроль скосу технологічного вікна

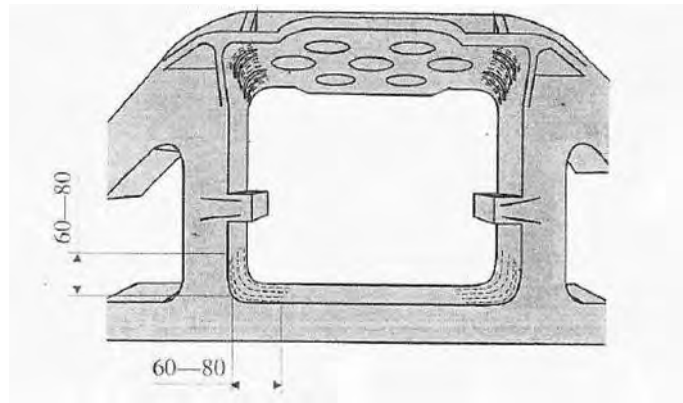


Рис. 1.11 Контроль ресорного прорізу

Сканування верхнього та нижнього кутів ресорного прорізу бокової рами слід виконувати з кроком 5-8 мм, як показано на рисунку 1.11, де напрямки сканування позначені пунктирними лініями. Це дозволяє забезпечити ефективний контроль цих ділянок для виявлення можливих дефектів.

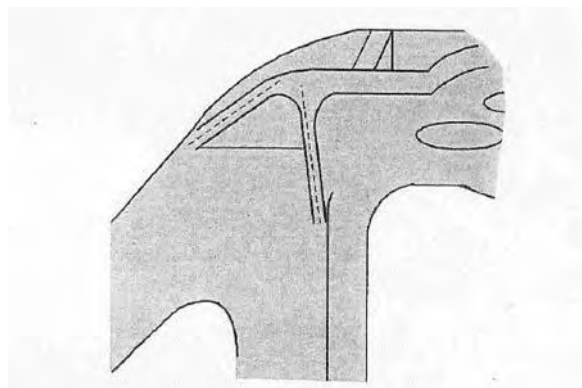


Рис. 1.12 Контроль ребер підсилення ресорного прорізу бокових рам

Сканування скосу ребер підсилення ресорного прорізу бокової рами слід виконувати з кроком 5-8 мм, як показано на рисунку 1.12, де напрямки сканування позначені пунктирними лініями. При цьому поздовжня вісь ферозондового перетворювача повинна бути орієнтована паралельно скосам ребер для забезпечення максимальної чутливості під час контролю.

### **1.5 Порядок проведення магнітопорошкового неруйнівного контролю бокових рам моделі 18-100**

Проведення магнітопорошкового контролю бокових рам вантажних вагонів здійснюється за допомогою прикладеного магнітного поля. Для цього

використовуються намагнічуюча установка типу НМС 34, а також локальний намагнічуючий пристрій МСН 14.

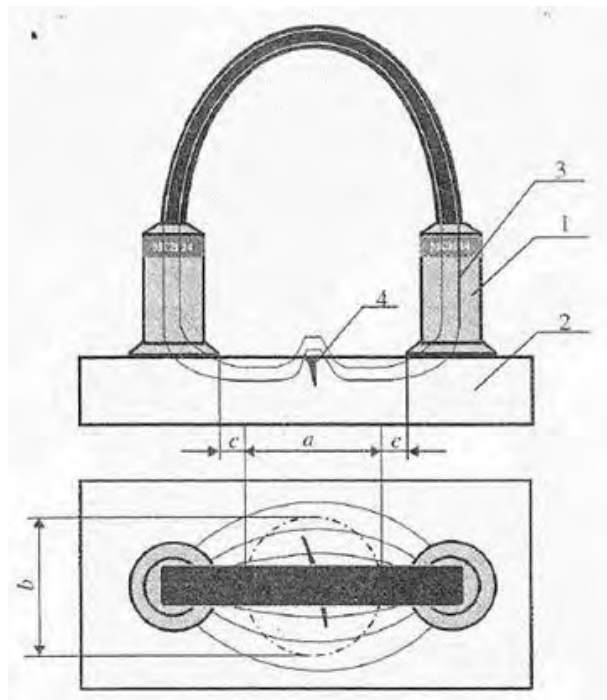


Рис. 1.13 Намагнічування деталі приладом МСН 14

На рисунку 1.13 показано процес намагнічування деталі за допомогою приладу МСН 14:

1. намагнічуючий пристрій.
  2. деталь, що контролюється.
  3. лінії магнітного поля.
  4. тріщина (дефект).
- $a$  та  $b$  – відповідно довжина і ширина зони контролю.
  - $c$  – ширина зони поблизу магніту, яка не контролюється.
  - Цей метод дозволяє локалізувати магнітне поле у зоні контролю, що підвищує ефективність виявлення дефектів, таких як тріщини та інші порушення суцільності матеріалу.

Ширина зони контролю  $b$  вибирається з урахуванням очікуваної довжини тріщини, а довжина зони  $a$  має бути в межах 50-100 мм. Неконтрольована зона  $c$  повинна складати 100-150 мм. Після завершення намагнічування магнітну

суспензію наносять на поверхню деталі, яку перевіряють, обережно поливаючи слабким потоком, щоб не змити магнітні частинки, які осіли над дефектом.

Перед нанесенням суспензії її необхідно ретельно перемішати лопаткою, виготовленою з немагнітного матеріалу (дерево, алюміній, пластмаса, мідь тощо), для забезпечення рівномірного розподілу магнітних частинок по всьому об'єму суспензії.

Якщо в якості індикатора використовуються люмінесцентні порошки, огляд деталей здійснюється за допомогою ультрафіолетового випромінювача. Результати контролю оцінюються за наявністю індикаторного рисунка над зоною, що перевіряється. Вид і форма рисунка залежать від типу та розмірів дефекту, а також від виду індикатора, який використовується.

Над поверхневими тріщинами втоми індикаторні рисунки виглядають як чіткі, тонкі, щільні лінії магнітного порошку, що простягаються по всій довжині тріщини. У випадку гарячих тріщин утворюється чіткий, але переривчастий і розгалужений індикаторний рисунок. Над підповерхневими дефектами, такими як тріщини, неметалічні включення або пори, індикаторний рисунок набуває вигляду широких смуг або плям з розмитими контурами.

Важливо відрізнити характерні індикаторні рисунки від оманливих накопичень магнітного порошку, які можуть виникати в таких випадках:

1. У місцях різкої зміни площі поперечного перерізу деталі.
2. На рисках з гострими кутами (магнітні частинки можуть накопичуватися в рисках, не утворюючи чітких ліній).
3. У точках дотику двох попередньо намагнічених деталей або дотику намагнічених деталей з гострими предметами, такими як викрутка.
4. На межах ділянок, які піддавалися механічній обробці або клепаю.

Для відрізнєння тріщини від риски рекомендується ретельно зачистити місце накопичення порошку дрібнозернистим наждачним полотном і повторно провести контроль. Під час цього спостерігають за утворенням магнітного порошку за допомогою лупи, поки стікає суспензія. Утворення валка магнітного порошку свідчить про наявність тріщини.

Якщо під час контролю на поверхні з'явилося скупчення магнітного порошку у вигляді лінії, яка утворює кут менший за  $45^\circ$  з вектором напруженості магнітного поля, при повторному контролі необхідно змінити кут намагнічуючого приладу так, щоб він був близьким до  $90^\circ$ . Це забезпечить максимальну чутливість до дефектів у даному напрямку.

Під час магнітопорошкового контролю, за виглядом індикаторних рисунків визначають кількість і довжину виявлених дефектів. Довжину протяжного дефекту приймають рівною довжині валка магнітного порошку, що утворився над ним. Якщо група дефектів розташована на відстані, меншій за довжину найменшого з них, їх розглядають як один суцільний дефект. Після цього місця дефектів відмічаються крейдою для подальшої обробки.

Магнітопорошковий контроль застосовується для перевірки кутів буксового прорізу, а також інших критичних вузлів деталі. Він може бути використаний для підтвердження результатів ферозондового неруйнівного контролю, забезпечуючи додаткову надійність виявлення дефектів.

## **1.6 Критерії бракування бокових рам**

На рисунку 1.14 показані місця виникнення дефектів, які можуть з'являтися в елементах конструкції бокових рам вантажних вагонів моделі 18-100. У таблиці 1.1 наведені можливі типи дефектів у різних зонах конструкції, а також критерії для бракування, які враховують геометричні розміри дефектів і глибину їх залягання. Ця інформація дозволяє правильно оцінити стан бокових рам і прийняти рішення про можливість подальшої експлуатації або необхідність ремонту.



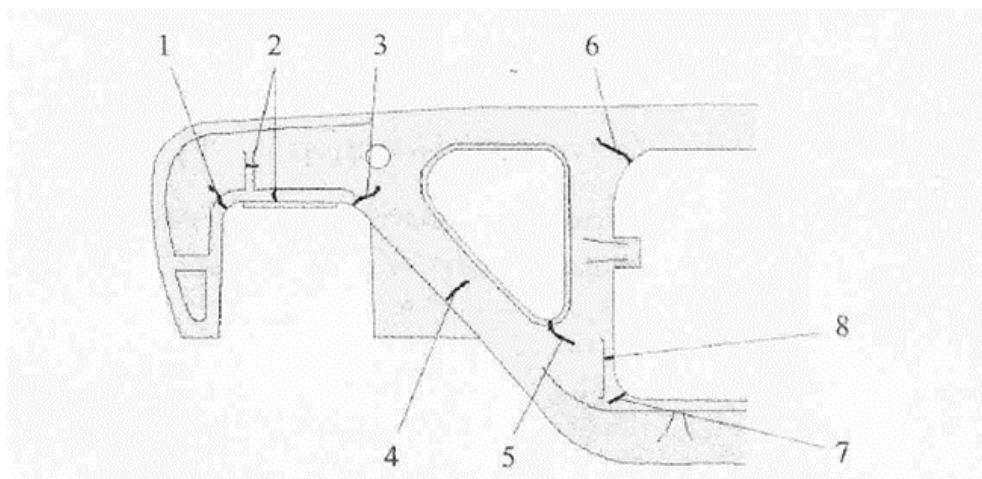


Рис. 1.14. Дефекти бокових рам вантажних вагонів моделі 18-100

Номер зони відповідно до рисунку	Зона контролю	Характеристика дефекту	Критерій бракування	Застосовуваний засіб
1	Кут буксового прорізу зовнішній	Тріщини поверхневі та під поверхневі, поперечні та похилі	Незалежно від розміру	Брак
		Раковини ливарні	Незалежно від довжини, глибиною більш ніж 2 мм	Брак
2	Поличка та скіс над буксовим прорізом	Тріщини поверхневі та під поверхневі будь-якого напрямку	Незалежно від розміру	Брак
3	Ребро підсилення над буксовим прорізом	Тріщини поверхневі та під поверхневі, поперечні та похилі	Незалежно від розміру	Брак
		Раковини ливарні	Незалежно від довжини, глибиною більш ніж 2 мм	Брак

4	Похилий пояс	Тріщини поверхневі та під поверхневі, поперечні та похилі	Незалежно від розміру	Брак
		Раковини ливарні	Незалежно від довжини, глибиною більш ніж 2 мм	Брак
5	Кромка технологічного отвору	Тріщини поверхневі та під поверхневі, поперечні та похилі	Незалежно від розміру	Брак
6	Кут ресорного прорізу верхній	Тріщини поверхневі та під поверхневі, поперечні та похилі	Незалежно від розміру	Брак
		Раковини ливарні	Незалежно від довжини, глибиною більш ніж 2 мм	Брак
7	Кут ресорного прорізу нижній	Тріщини поверхневі та під поверхневі, поперечні та похилі	Незалежно від розміру	Брак
		Раковини ливарні	Незалежно від довжини, глибиною більш ніж 2 мм	Брак
8	Ребро посилення ресорного прорізу	Тріщини поверхневі та під поверхневі,	Такі, що виходять на спряжені поверхні	Брак

		поперечні та похилі	Такі, що не виходять на спряжені поверхні	Ремонт
--	--	---------------------	---	--------

Таблиця 1.1. Критерії бракування бокових рам вантажних вагонів моделі 18-

100

### 1.7 Аналіз магнітних полів розсіювання, що виникають над дефектами

При виборі оптимального методу контролю слід враховувати фізичні особливості утворення магнітних полів розсіювання, які виникають у зонах розташування дефектів. Під час намагнічування коротких деталей на їхніх краях утворюються магнітні полюси, які за аналогією з електростатикою можуть бути описані фіктивним магнітним зарядом. Поверхнева щільність цього заряду пропорційна зміні намагніченості деталі.

Якщо у січенні деталі наявне порушення суцільності або інша неоднорідність, що спричиняє зміну намагніченості, у цій зоні також утворюються магнітні полюси. Вони створюють поле розсіювання дефекту. Інтенсивність магнітного поля розсіювання зростає залежно від розмірів дефекту і відстані його розташування до поверхні, над якою проводиться контроль. Чим більший дефект і ближче він до поверхні, тим сильніше виявляється поле розсіювання, що полегшує його виявлення за допомогою магнітопорошкових методів.

Для деяких матеріалів, таких як леговані та високо вуглецеві сталі, магнітне поле розсіювання може досягати значної величини навіть за умов залишкової намагніченості. Аналізуючи величину та топографію (просторовий розподіл) цього поля розсіювання, можна оцінити розміри та місцезнаходження дефекту.

Однак встановити аналітичну залежність між полем розсіювання, геометричними параметрами дефектів і магнітними характеристиками матеріалу є складним завданням. Для оцінки цього зв'язку застосовуються

різні моделі та наближення, які дозволяють отримати приблизні результати. Ці підходи використовуються для того, щоб краще зрозуміти природу магнітних полів розсіювання та забезпечити точніший контроль якості виробів.

Типовий вигляд складових магнітного поля розсіювання поверхневого дефекту (компоненти  $H_x$  та  $H_y$ ) і їх похідних наведено на рисунку 1.5. Ці складові відображають характер розподілу магнітного поля навколо дефекту та можуть використовуватися для оцінки його розмірів і глибини залягання. Аналіз похідних компонентів поля дозволяє точніше локалізувати місцезнаходження дефекту та визначити його вплив на суцільність матеріалу.

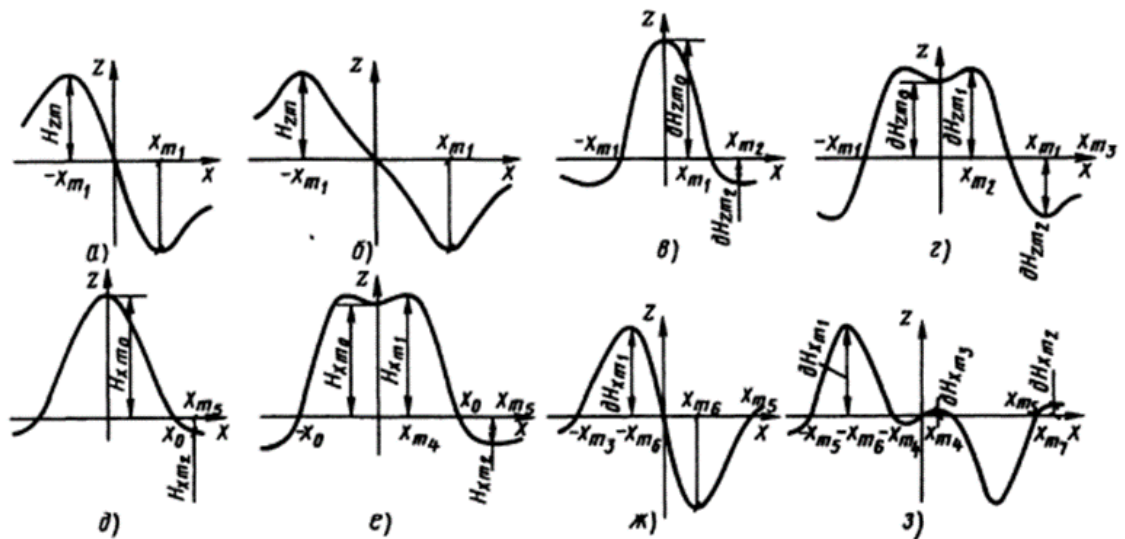


Рис. 1.15

На рисунку 1.15 зображено складові  $H_x$  та  $H_y$  магнітного поля розсіювання дефекту та їхні основні похідні. Криві сигналів перетворювача представлені для двох значень відстані між полюсами диполя: а, б, д, ж — до критичного; в, г, е, з — надкритичного. Ці графіки відображають поведінку магнітного поля поблизу дефекту, що дозволяє оцінити його розміри та характер. Аналіз таких кривих допомагає визначити, наскільки поле змінюється внаслідок присутності дефектів, і може бути використаний для оптимізації методів виявлення та інтерпретації даних магнітопорошкового контролю.

## 1.8 Способи намагнічування та розмагнічування деталей

Методи намагнічування об'єктів контролю можна узагальнити у вигляді таблиці 1.2, яка класифікує їх за типом струму, взаємодією з об'єктом контролю та способом впливу.

Способи намагнічування об'єктів контролю		
За родом намагнічування струму	За взаємодією з об'єктом контролю	За способом впливу
постійним струмом; змінним струмом; імпульсним струмом;	<ul style="list-style-type: none"><li>• повздожнє (полюсне) намагнічування;</li><li>• циркулярне намагнічування;</li><li>• комбіноване намагнічування;</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• контроль у прикладеному полі;</li><li>• контроль у залишковому полі;</li></ul>

Таблиця 1.2. Узагальнена таблиця способів намагнічування деталей

Для намагнічування деталей використовуються різні типи струму, такі як постійний (двопівперіодний випрямлений або трифазний випрямлений), змінний, однопівперіодний випрямлений та імпульсний. Оптимальне виявлення дефектів досягається, коли напрямок намагнічування перпендикулярний до орієнтації дефекту. У зв'язку з цим, прості деталі намагнічують у двох взаємно перпендикулярних напрямках, тоді як для складних деталей з нестандартною геометрією використовують кілька напрямків намагнічування, щоб забезпечити максимальну ефективність контролю.

Намагнічування постійним струмом має такі переваги, як стабільність струму та відсутність вихрових струмів, що забезпечує намагнічування на всю глибину об'єкта контролю. Проте, його недоліком є складність у створенні великих намагнічувальних струмів, які можуть досягати кількох кА.

Намагнічування змінним струмом є досить зручним, оскільки дозволяє використовувати трансформатори для підвищення ефективності процесу.

Однак необхідно забезпечити вимкнення струму при досягненні максимального значення поля насичення, щоб уникнути перегріву та забезпечити належну якість намагнічування.

Імпульсний струм створює певні труднощі, оскільки внутрішні та зовнішні ділянки об'єкта контролю намагнічуються по-різному. Однак, у цьому випадку зменшується розмагнічування на кінцях об'єкта контролю, що може бути корисним у певних ситуаціях.

Для створення оптимальних умов намагнічування використовуються три основні методи: циркулярне, повздовжнє (або полюсне) та комбіноване намагнічування.

Циркулярне намагнічування реалізується шляхом пропускання струму через деталь, яка контролюється, або через провідник (стрижень), розміщений у отворі деталі. Цей метод є найбільш ефективним для деталей, що мають форму тіл обертання. Проте, при пропусканні струму через деталі складної форми, виступи та інші нерівності можуть не бути намагнічені до необхідного рівня. У таких зонах слід вимірювати напруженість магнітного поля і контролювати, щоб вона досягала потрібного значення. При циркулярному намагнічуванні магнітний потік спрямований перпендикулярно до струму намагнічування, тому найкраще виявляються дефекти, які орієнтовані уздовж напрямку струму.

Одним із різновидів циркулярного намагнічування є намагнічування за допомогою наведення струму в деталі. Для цього використовується трансформатор, де деталь, що контролюється, виступає вторинною обмоткою або частиною осердя. Цей метод дозволяє забезпечити рівномірне намагнічування складних форм, використовуючи індукційний принцип.

Комбіноване намагнічування передбачає одночасне намагнічування деталі двома або більше змінними магнітними полями. Для цього можуть застосовуватися різні комбінації видів струму. Основна умова комбінованого

намагнічування полягає в тому, щоб сумарний вектор намагніченості повертався відносно деталі на кут не менший за  $90^\circ$ .

Це досягається за рахунок поєднання циркулярного і повздовжнього намагнічування. Для реалізації цього методу використовуються струми одного виду, але з різницею у фазі або часі включення (наприклад, для імпульсних струмів). Також можливе використання струмів різних типів із відповідними моментами включення або зміни їхньої величини і напрямку. Такий підхід забезпечує рівномірне намагнічування та підвищує ефективність виявлення дефектів різної орієнтації.

Існує два основні способи контролю деталей: у прикладеному полі та в залишковому полі.

Контроль у прикладеному полі: при цьому методі об'єкт намагнічують і одночасно здійснюють контроль поля розсіювання дефектів. Такий підхід дозволяє досягати великих значень магнітної індукції, що робить його особливо ефективним для магнітом'яких матеріалів із низьким рівнем залишкової індукції. Проте цей метод має певні недоліки. Одним з основних є те, що магнітне поле намагнічування разом із полем розсіювання дефекту може впливати на перетворювач, що призводить до спотворення результатів. Крім того, при контролі малих об'єктів може утворюватися значне поле розсіювання, що ускладнює точність вимірювань.

Контроль у залишковому полі: у цьому випадку деталь намагнічують до стану насичення, після чого поле намагнічування вимикають, і проводять контроль. Цей метод найчастіше використовується для магнітотвердих матеріалів. Його перевагою є відсутність впливу зовнішнього поля на перетворювач, що сприяє більш точним результатам. Однак основним недоліком методу є його порівняно низька чутливість.

Вибір способу контролю визначається конкретними умовами, метою та необхідним рівнем чутливості.

Для розмагнічування застосовуються два основні методи. Найбільш ефективним є нагрівання виробу до температури точки Кюрі, при якій магнітні властивості матеріалу повністю зникають. Однак, цей метод використовується рідко, оскільки під час такого нагрівання можуть змінюватися механічні властивості матеріалу, що в більшості випадків є недопустимим для деталей, які підлягають контролю.

Другий спосіб розмагнічування полягає у використанні змінного магнітного поля з амплітудою, яка поступово зменшується від максимального значення до нуля. Залежно від матеріалу та форми виробу, для цього методу застосовують змінні магнітні поля з частотами від кількох Гц до 50 Гц. Такий підхід дозволяє ефективно знижувати залишкову намагніченість без суттєвого впливу на властивості матеріалу.

Допустимий рівень залишкової намагніченості деталі після розмагнічування визначається вимогами технологічного процесу, подальшої обробки, збірки та експлуатації. Наприклад, деталі, які підлягають термічній обробці з нагріванням вище точки Кюрі, не потребують розмагнічування, оскільки їхні магнітні властивості автоматично зникають при такій обробці. Також немає необхідності розмагнічувати деталі, що залишаються нерухомими відносно одна одної після збірки, оскільки вони не можуть впливати на намагнічення рухомих компонентів, таких як підшипники, або створювати магнітні поля, які б впливали на роботу магнітних датчиків.

Варто зазначити, що повністю розмагнітити деталь до рівня нульової залишкової намагніченості неможливо, оскільки на неї постійно впливають магнітне поле Землі, магнітні поля навколишніх предметів, а також струми, що протікають поблизу.

Для розмагнічування деталей використовуються різні пристрої, які зазвичай представляють собою соленоїди змінного струму з різними частотами. Розмагнічування може відбуватися шляхом подачі струму через соленоїд або шляхом поступового видалення деталі з центральної частини соленоїда до зони, де напруженість магнітного поля стає практично нульовою.



Також можливе розмагнічування за допомогою циркулярного магнітного поля, яке створюється змінним струмом, що проходить через деталь або стрижень, вставлений в отвір деталі. В цьому випадку струм повинен плавно знижуватися до нуля, щоб забезпечити ефективне розмагнічування. Деякі системи оснащені автоматичними пристроями для поступового зменшення струму розмагнічування.

Одним з недоліків цього методу є складність у перевірці, чи дійсно деталь повністю розмагнітилася. У деяких випадках для розмагнічування застосовують спеціальні джерела струму, які представляють собою коливальні контури, що працюють у режимі затухаючих коливань, забезпечуючи поступове зменшення магнітного поля.

## **1.9 Магнітопорошковий метод неруйнівного контролю**

Магнітопорошковий метод дозволяє контролювати до 70% усієї продукції завдяки здатності виявляти магнітні поля розсіювання, що виникають над дефектами. Коли в матеріалі присутні тріщини або інші неоднорідності, магнітне поле виходить за межі деталі, утворюючи локальні магнітні полюси. Найбільша щільність силових ліній поля розсіювання спостерігається безпосередньо над дефектом і зменшується з віддаленням.

Для виявлення таких неоднорідностей на поверхню деталі наносять магнітний порошок, який може бути використаний у повітрі (сухий спосіб) або в рідині (мокрый спосіб). На частинку магнітного порошку, що знаходиться в полі розсіювання, впливають кілька сил:

- Сила магнітного поля  $F_z$ , яка спрямована до зони найбільшої щільності магнітних ліній, тобто до місця розташування дефекту.
- Сила тяжіння  $F_T$ , яка діє вниз.
- Сила рідини, що виштовхує  $F_A$  (тільки для мокрого способу).
- Сила тертя  $F_{тр}$ , що протидіє руху частинки.



Паралельне поєднання ланцюжків феромагнітних частинок у суспензії майже не відбувається, оскільки при їх зближенні діють магнітні сили відштовхування через однойменні полюси. Ланцюжки зміщуються один відносно одного уздовж своїх повздовжніх осей через неоднорідність магнітного поля вздовж ланцюжка та концентрацію магнітостатичних зарядів на торцевих поверхнях. В результаті ланцюжки частіше з'єднуються торцями.

На ефективність магнітної коагуляції впливають такі фактори, як концентрація частинок, їх розмір (дисперсність), магнітні характеристики, попередній магнітний стан порошку, в'язкість дисперсійного середовища, напруженість та градієнт магнітного поля, тривалість дії поля та автокоагуляція. Регулюючи ці параметри, можна досягти оптимального складу суспензії для контролю конкретних об'єктів.

Таким чином, магнітна коагуляція виконує дві функції: при оптимальній інтенсивності вона покращує здатність виявляти дефекти, оскільки сила, що діє на частинку у ланцюжку, більша, ніж на окрему частинку. Проте, при надмірно високій інтенсивності коагуляції здатність виявлення дефектів може знижуватися через низьку чутливість довгих ланцюжків до полів малих дефектів і значний фоновий шум від порошкових частинок на поверхні.

Магнітопорошковий контроль може проводитися як у залишковому, так і в прикладеному магнітному полі. Вибір методу залежить від способу намагнічування деталі. Таблиця 1.4 показує послідовність виконання технологічних операцій для кожного з методів:

Спосіб магнітопорошкового контролю	Технологічні операції
У залишковому полі	1. Підготовка деталі до контролю
	2. Намагнічування деталі.
	3. Нанесення суспензії.
	4. Огляд, визначення відповідності технічній документації.
	5. Розмагнічування, контроль залишкової намагніченості.
У прикладеному полі	1. Підготовка деталі до контролю.
	2. Нанесення суспензії.
	3. Намагнічування.
	4. Огляд, визначення відповідності технічній документації.
	5. Розмагнічування, контроль залишкової намагніченості.

Таблиця 1.4. Послідовність виконання технологічних операцій магнітопорошкового контролю.

Магнітні індикатори – це матеріали, які використовуються для виявлення дефектів під час магнітопорошкового контролю. Вони включають магнітні суспензії, порошки та полімеризовані суміші. Вибір індикаторів і методів їх нанесення залежить від цілей і умов контролю.

#### **Основні переваги магнітопорошкового методу контролю:**

1. Результати контролю майже миттєві, з'являються протягом 1-2 секунд після нанесення суспензії (час підготовки та обробки результатів не враховується).
2. Результати можуть бути зафіксовані за допомогою фотографій, магнітних стрічок тощо.

3. Метод можна використовувати під час експлуатації без потреби у джерелах змінного струму, використовуючи постійні магніти або портативні намагнічуючі пристрої.
4. Інтерпретація результатів є простою.
5. Магнітні рисунки максимально відображають форму та тип дефекту.
6. Метод не вимагає високої кваліфікації обслуговуючого персоналу.
7. Економічно вигідний у порівнянні з іншими методами.
8. Підходить для контролю будь-якого розміру та форми поверхонь.
9. Контроль можна виконувати на кожному етапі виробництва.
10. Підготовчі операції менш критичні, ніж у методах з проникаючими речовинами.
11. Можна контролювати крізь покриття, хоча чутливість зменшується пропорційно до товщини покриття.
12. Безпечний для здоров'я.
13. Дозволяє контролювати кілька частин однієї конструкції, використовуючи залишкове поле.
14. Може бути автоматизований на виробничих лініях.

Основні недоліки магнітопорошкового методу:

1. Придатний лише для феромагнітних матеріалів.
2. Виявляє дефекти тільки на поверхні або близько до неї.
3. Може вимагати розмагнічування до, під час або після контролю.
4. Дефекти виявляються тільки, якщо їх вісь перетинає силові лінії намагнічування.
5. Деякі техніки можуть впливати на якість зразка через можливий перегрів.
6. Потрібне зняття покриття для забезпечення електричного контакту.
7. Труднощі у забезпеченні стабільного магнітного потоку для складних форм.

8. Складність інтерпретації даних при локальних змінах властивостей матеріалу або складних формах.

### 1.10 Магніторезистивний метод контролю

Магніторезистивний метод контролю базується на використанні магніторезисторів – електронних компонентів, чий електричний опір змінюється під впливом магнітного поля. Цей метод відрізняється високою чутливістю, компактними розмірами, широким діапазоном робочих температур, стабільністю, низькою напругою зміщення та стійкістю до механічних навантажень.

Магніторезистивні перетворювачі здатні точно вимірювати лінійні й кутові зміщення навіть у складних умовах. Вони можуть реагувати на незначні переміщення компонентів (наприклад, зубчастих коліс, металевих стрижнів або кулачків), створюючи достатні зміни магнітного поля для проведення вимірювань. Ці перетворювачі використовуються також для вимірювання обертової швидкості та струму.

Принцип дії магніторезистивних перетворювачів ґрунтується на магніторезистивному ефекті, який полягає в зміні опору провідного магнітного матеріалу під впливом зовнішнього магнітного поля. На рисунку 1.17 схематично показано принцип роботи магніторезистивного перетворювача, де зміна опору залежить від орієнтації магнітного поля щодо струму в матеріалі.

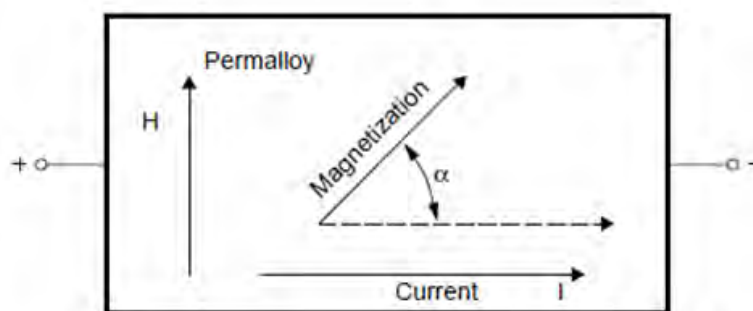


Рис. 1.17 Магніторезистивний ефект у пермаллої

Стрічка з феромагнітного матеріалу, відома як пермалой (складається з 20% заліза і 80% нікелю), в умовах відсутності зовнішнього магнітного поля має вектор намагніченості, що збігається з напрямком струму. При прикладенні зовнішнього магнітного поля, яке діє перпендикулярно до напрямку струму, вектор намагніченості повертається на певний кут  $\alpha$ . В результаті цього опір пермалойної стрічки змінюється в залежності від кута  $\alpha$ , згідно з наступним рівнянням:

$$R = R_0 + \Delta R_0 \cos^2 \alpha \quad (1.3)$$

де  $R$  — опір пермалоя,  $R_0$  — початковий опір, а  $\Delta R_0 \cos^2 \alpha$  відображає зміну опору під дією магнітного поля. Використання різних пропорцій нікелю і заліза дозволяє досягати оптимальних значень параметрів опору. Наприклад, при вмісті 19% заліза і 81% нікелю величина зміни опору  $\Delta R_0$  може складати близько 3%.

Через нелінійний характер рівняння (1.3), магнітне поле може спричинити кілька значень напруженості для кожного рівня опору. Для лінеаризації застосовують спеціальні прийоми, такі як стрічки з алюмінію, що розташовуються під кутом  $45^\circ$  до основного осі намагнічування. Це дозволяє уникнути перешкод, спричинених змінами опору під впливом зовнішнього поля, і забезпечити точніше вимірювання.

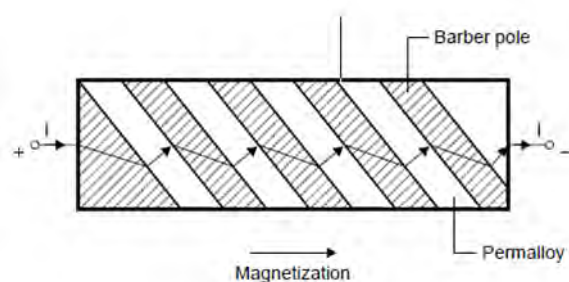


Рис. 1.18 Лінеаризація магніторезистивного ефекту

Включення магніторезисторів у мостову схему Віна дозволяє виконати лінеаризацію. У такій схемі одна пара елементів розташовується так, що алюмінієві стрічки повернуті на кут  $+45^\circ$ , а інша пара — на кут  $-45^\circ$ . При

прикладенні зовнішнього магнітного поля спостерігається збільшення опору однієї пари резисторів і одночасне зменшення опору іншої пари на ту саму величину. У результаті вихідна напруга мостової схеми стає лінійно залежною від амплітуди зовнішнього магнітного поля, яке є перпендикулярним до вектора напруженості матеріалу.

При вимірюванні слабких магнітних полів, таких як магнітне поле Землі (напруженість поля близько 30-50 А/м), виникає потреба у перетворювачах із високою чутливістю. Магніторезистивні перетворювачі добре підходять для таких завдань. Для підвищення стабільності роботи таких перетворювачів можна використовувати котушку, намотану навколо магніторезистора, для генерації коротких імпульсів малих потужностей. Такий прийом дозволяє зберегти чутливість навіть у випадку слабких сигналів.

Додатково, на чутливість можуть впливати інші фактори, як-от зміни температури або зовнішні механічні впливи, що здатні погіршити точність вимірювань. Тому використовують різні методи компенсації, які допомагають мінімізувати негативний вплив зовнішніх факторів.

### **1.11 Ферозондовий метод неруйнівного контролю**

Ферозондовий перетворювач магнітного поля, відомий як ферозонд, призначений для визначення та реєстрації постійних і повільно змінних магнітних полів, а також їх градієнтів. Принцип роботи ферозонда ґрунтується на зміні магнітного стану феромагнітного матеріалу під дією двох магнітних полів, що мають різні частоти.

У найпростішому виконанні ферозонд складається з феромагнітного осердя, на якому розташовані дві котушки:

- Котушка збудження, яка живиться змінним струмом для створення магнітного поля.



- Вимірювальна (сигнальна) котушка, призначена для реєстрації змін у магнітному стані осердя, що виникають під впливом зовнішнього магнітного поля.

Осердя ферозонда виготовляють з матеріалів, які характеризуються високою магнітною проникністю. Для роботи ферозонда на котушку збудження подають змінну напругу від генератора з частотою в межах від 1 до 300 кГц, що залежить від параметрів та призначення приладу. Коли зовнішнє магнітне поле відсутнє, осердя перемагнічується під впливом змінного магнітного поля  $H$ , яке створюється струмом у котушці збудження, і цей процес відбувається за симетричним циклом.

Зміна магнітного поля, що відбувається в результаті перемагнічування осердя за симетричною кривою, спричиняє індукцію електрорушійної сили (ЕРС) у сигнальній котушці, яка змінюється за гармонійним законом. Якщо на осердя одночасно впливає вимірюване постійне або повільно змінне магнітне поле  $H_0$ , крива перемагнічування стає асиметричною, що змінює величину та гармонійний склад ЕРС у сигнальній котушці. У такому випадку з'являються парні гармонійні складові ЕРС, величина яких прямо пропорційна напруженості вимірюваного поля, і вони відсутні при симетричному циклі перемагнічування.

Ферозонди діляться на:

- 1) стрижневий одноелементний (рис.1.7 а)
- 2) диференційні з розімкненим осердям (рис.1.7 б)
- 3) диференційні з замкненим осердям (рис.1.7в)

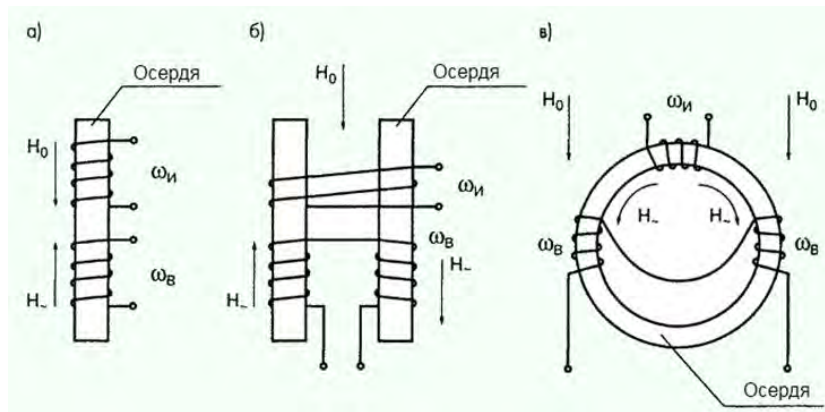


Рис.1.19 Варіанти конструкцій ферозондів.

Диференційний ферозонд зазвичай складається з двох осердь з обмотками, які з'єднані так, що непарні гармонійні складові практично взаємно компенсуються. Це спрощує вимірювальну апаратуру і підвищує чутливість ферозонда до магнітних полів.

Ферозонди мають надзвичайно високу чутливість, що дозволяє реєструвати магнітні поля з напруженістю до  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  А/м (або приблизно  $10^{-10}$   $10^{-11}$ Тл). Сучасні ферозонди є компактними, їх об'єм може бути менше  $1 \text{ см}^3$ , а трикомпонентні моделі можуть вписуватися в куб зі стороною 15 мм.

На прикладі показана конструкція мініатюрного стрижневого ферозонда. Його конструкція досить проста: осердя виготовлене з пермалою, а поперечний переріз осердя зменшується в 10 разів у центральній частині. На осердя намотані вимірювальна обмотка і обмотка збудження.

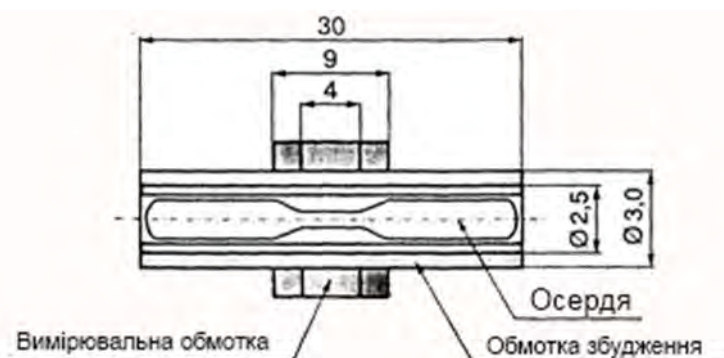


Рис.1.20. Мініатюрний стрижневий ферозонд

Типові ферозондові перетворювачі мають діапазон вимірювання від  $\pm 50$  до  $\pm 100$  А/м (або  $\pm 0,06 \dots \pm 0,126$  мТл). Щільність магнітного шуму при частотах до 0,1 Гц для ферозондів зі стрижневими осерддями складає 30-40 мкА/м ( $\text{м} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ ), причому вона знижується зі збільшенням поля збудження. При частотах до 0,5 Гц щільність шуму зростає в 3-3,5 рази. Дослідження показали, що кільцеві ферозонди мають значно нижчий рівень шуму порівняно зі стрижневими.

### **1.13 Порівняльний аналіз основних характеристик перетворювачів магнітного поля**

Для забезпечення надійної роботи магнітної системи контролю проведено аналіз технічних характеристик п'яти магнітних перетворювачів. До порівняння включені: **MAG3110**, **SS39ET**, **MAG567**, **MMC5983MA**, а також датчик **MMC5603NJ**.

**MAG3110** - є представником магніторезистивних перетворювачів і демонструє компактні розміри, високу чутливість та низьке енергоспоживання. Цей датчик дозволяє вимірювати напруженість магнітного поля у трьох взаємно перпендикулярних координатах. Детальні технічні параметри наведені у таблиці 1.5.

**SS39ET** - побудований на основі ефекту Холла, що дозволяє йому працювати як із постійними, так і зі змінними магнітними полями. Завдяки універсальності та стабільності роботи, цей датчик є оптимальним для широкого спектра застосувань. Його характеристики зведені у таблиці 1.5.

**MAG567** - ферозондовий перетворювач, спеціалізується на вимірюванні слабких магнітних полів із високою точністю. Його параметри представлені у таблиці 1.5.

**MMC5983MA** є багатофункціональним триосьовим магнітометром, який забезпечує великий діапазон вимірювання та високу точність. Він має низький рівень шумів та вбудовані функції автоматичного калібрування, що

дозволяє використовувати його в задачах з підвищеними вимогами до точності. Його технічні характеристики описані у таблиці 1.5.

**MMC5603NJ** є ще одним триосьовим магнітометром, який виділяється надзвичайно малим енергоспоживанням та високою чутливістю. Цей датчик підтримує широкий діапазон вимірювання та має інтегровану цифрову обробку сигналів, що забезпечує точність і стабільність вимірювань. Основні параметри наведені у таблиці 1.5.

Для наочності всі технічні параметри цих магнітних перетворювачів зведені у порівняльну таблицю. Це дозволяє швидко оцінити їхні переваги та недоліки залежно від вимог до системи контролю.

Таблиця 1.3 Основні параметри перетворювачів.

Параметр	MAG3110	MMC5983MA	MMC5603NJ	SS39ET	MAG657
Діапазон вимірювання (мкТл)	±1000	±800	±3000	±100000	±524
Роздільна здатність (біт)	12	18	20	14	-
Чутливість (мкТл/LSB)	0.1	0.25	0.0625	10	-
Частота оновлення даних (Гц)	80	1000	1000	-	3000
Робоча напруга (В)	1.95-3.6	1.6 – 3.6	1.8-3.6	2.7-6.5	10-20
Інтерфейс	I <sup>2</sup> C	I <sup>2</sup> C	I <sup>2</sup> C, I <sup>3</sup> C	Аналоговий	Аналоговий
Споживання струму (мА)	~8.6 при 10 Гц	~20 при 100 Гц	3.4 при 100 вим/с	-	10
Розміри корпусу (мм)	2×2×0.85	1.6×1.6×0.6	0.8×0.8×0.4	2.9×2.8×1.45	75×50.5×225
Робочий температурний діапазон (°C)	-40 до +85	-40 до +125	-40 до +85	-40 до +100	-10 до +45

На основі порівняльного аналізу характеристик перетворювачів магнітного поля, можна зробити висновок, що **MMC5603NJ** має найбільш збалансовані

технічні параметри серед розглянутих варіантів. Його основні переваги включають:

- **Висока чутливість та роздільна здатність:** Завдяки роздільній здатності у **20 біт** і чутливості **0.0625 мкТл**, цей датчик дозволяє точно вимірювати навіть мінімальні зміни магнітного поля.
- **Широкий діапазон вимірювання:** **±3000 мкТл** охоплює більшість промислових та наукових потреб, включаючи слабкі та середньої інтенсивності магнітні поля.
- **Компактні габарити:** За рахунок малих габаритних розмірів магніторезисторів (**0.8×0.8×0.4 мм**) та малому відхиленню параметрів між ними, існує можливість використання їх у великій кількості на малій площі, що надає змогу значно підвищити роздільну здатність контролю.
- **Цифровий інтерфейс (I<sup>2</sup>C, I<sup>3</sup>C):** Забезпечує стабільну передачу даних із мінімальним рівнем шумів. Підтримка інтерфейсу I<sup>3</sup>C розширює можливості інтеграції у сучасні системи.
- **Висока частота оновлення:** Частота до **1000 Гц** дозволяє значно пришвидшити процес контролю бокових рам візків залізничних вагонів, покращуючи точність та ефективність моніторингу стану конструкцій.
- **Енергоефективність:** Незважаючи на високу продуктивність, споживання струму становить лише **3.4 мА при 100 вимірюваннях/с**, що робить його придатним для енергозалежних застосувань.
- **Широкий температурний діапазон:** **-40°C до +85°C** дозволяє використовувати датчик у різних умовах, включаючи екстремальні середовища.

Таким чином, **ММС5603NJ** є ідеальним вибором для контролю дефектів на підприємстві.

## Висновок до 1 розділу

У даному розділі було проведено детальний аналіз об'єкта контролю – бокової рами візка вантажного вагона, визначено ділянки з найбільшою

ймовірністю утворення дефектів та встановлено порогові значення для бракування. Окрім цього, здійснено огляд методів магнітного неруйнівного контролю, зокрема магнітопорошкового, ферозондового та магніторезистивного, які застосовуються для контролю таких конструкцій.

Порівняння методів виявило, що магніторезистивний метод є найбільш оптимальним для діагностики бокових рам завдяки високій чутливості, яка дозволяє значно підвищити точність контролю. Використання магнітних перетворювачів **MMC5603NJ** забезпечує можливість вимірювання напруженості магнітного поля у трьох взаємно перпендикулярних напрямках, що підвищує ефективність і надійність виявлення дефектів.

Завдяки малим габаритам магніторезисторів та їх високій чутливості, можна застосовувати їх у великій кількості на малій площі, що значно збільшує роздільну здатність контролю. Це дозволяє обійтись без стаціонарних намагнічуючих пристроїв великої потужності, використовуючи лише локальні намагнічуючі прилади, що полегшує проведення контролю в умовах експлуатації.

## **2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ НА ОСНОВІ MMC5603NJ**

### **Вступ**

У бокових рамах візків вантажних вагонів з часом утворюються різноманітні дефекти, що виникають через втому матеріалу, яка спричинена дією знакозмінних навантажень. Основна проблема контролю таких конструкцій полягає у складній геометричній формі рам, що значно ускладнює процес виявлення дефектів. Крім того, традиційні методи контролю мають кілька значних недоліків, серед яких низька продуктивність і недостатня роздільна здатність. Для вирішення цих проблем було розроблено макет магнітної системи контролю.

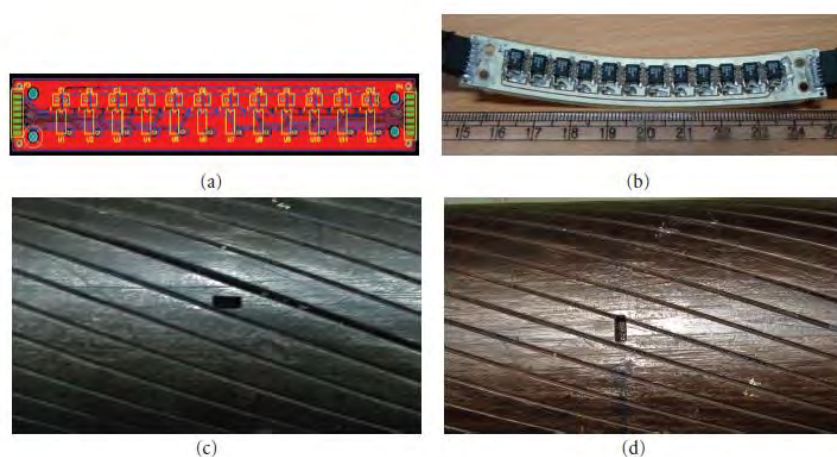
У цьому розділі описано основні принципи побудови та функціонування макету магнітної системи контролю, яка забезпечує можливість виявлення як поверхневих, так і підповерхневих дефектів. Ключовою перевагою розробленої системи є використання лінійки магніторезистивних датчиків, які мають значні переваги порівняно з іншими типами перетворювачів. Завдяки цьому система дозволяє значно покращити роздільну здатність виявлення дефектів і підвищити чутливість контролю. Крім того, застосування лінійного перетворювача забезпечує суттєве скорочення часу, необхідного для проведення операцій контролю.

### **2.1 Огляд застосування матричних магнітних систем із магніторезисторами в неруйнівному контролі**

Публікації, присвячені використанню матричних магнітних перетворювачів у неруйнівному контролі, мали значний інтерес ще понад десять років тому. Наприклад, у роботі [16], виконаній індійськими дослідниками Sharatchandra Singh, Rao, Thirunavukkarasu та Jayakumar, розглянуто використання магніторезистивної матриці для контролю стану вантажних тросів. Було продемонстровано, що ця технологія здатна ефективно ідентифікувати як поверхневі дефекти, так і втрати металевого покриття, спричинені втомою матеріалу. Монтажна плата системи та її макет, які

використовувалися для ідентифікації характерних дефектів, зображені на рисунку 2.1.

Попри те, що ці дослідження датуються більш ніж десятирічною давністю, їх результати залишаються актуальними для розуміння можливостей магніторезистивних сенсорів у задачах неруйнівного контролю. Вони демонструють потенціал таких систем у вирішенні специфічних задач, зокрема контролю геометрично складних об'єктів, таких як троси, з високою роздільною здатністю та точністю.



На рисунку 2.1 зображено матричну систему, розроблену для контролю вантажних тросів, де: (a) — монтажна плата системи, що містить матрицю магніторезисторів; (b) — макет магнітної системи в зібраному вигляді; (c) — приклад виявлення повздовжнього дефекту; (d) — приклад ідентифікації поперечного дефекту.

Подібна система дозволяє суттєво зменшити час, необхідний для проведення контролю, а також значно підвищити роздільну здатність у виявленні дефектів. Застосування гнучкого матеріалу як основи для розміщення магніторезисторів дає змогу ефективно охопити всю контрольовану поверхню, що підвищує точність і зручність використання системи.

У дослідженні [17], виконаному французькими вченими Vacher, Gilles-Pascaud, Decitre, Fermon та Pannetier, було продемонстровано використання магніторезисторів як сенсорів для виявлення дефектів у теплообмінних трубах, що застосовуються в ядерних реакторах. У ході експериментів було



виявлено не лише поверхневі дефекти невеликих розмірів, але й підповерхневі пошкодження на глибинах до 7 мм. При цьому вдалося досягти високої роздільної здатності на рівні близько 100 мкм, що підтверджує ефективність подібного підходу в задачах неруйнівного контролю.

Американські науковці С. Н. Smith, Schneider, Dogaru та S. T. Smith дослідили та продемонстрували можливості використання магніторезисторів, заснованих на гігантському магніторезистивному ефекті та ефекті спінозалежного тунелювання, у матричних перетворювачах для виявлення різноманітних дефектів [18]. Відмінною рисою магніторезисторів є їх компактність, висока чутливість і низьке споживання енергії, що робить їх ефективними у задачах неруйнівного контролю.

У межах цього дослідження було створено матрицю, яка складається з 16 чутливих елементів. Розміри кожного елемента становлять 5х6 мкм, а ширина активної зони складає 80 мкм. Така матриця надає можливість формувати тривимірне зображення контрольованої ділянки та здійснювати сканування шляхом електронного опитування кожного з перетворювачів. Зовнішній вигляд монтажної плати матриці наведено на рисунку 2.2.

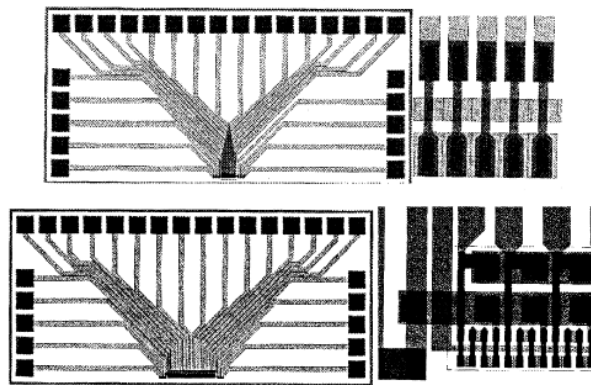
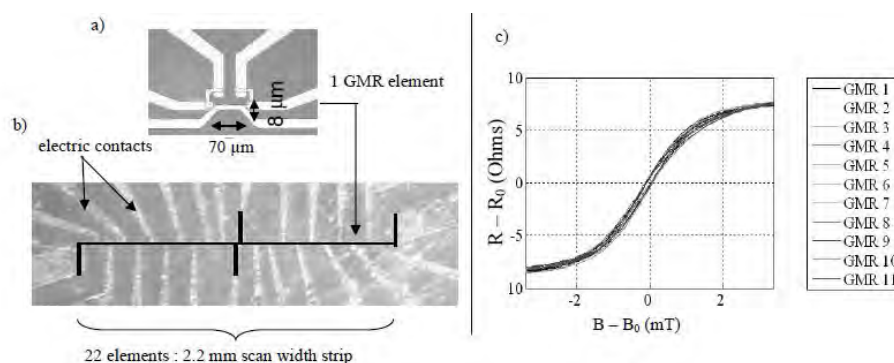


Рис. 2.2 демонструє монтажну плату 16-ти елементної матриці. У верхній частині зображено схему підключення з використанням одного чутливого елемента, тоді як у нижній частині показано схему підключення у вигляді “половинного моста”, який використовує два чутливих компоненти для забезпечення більш точного і стабільного вимірювання.

Експериментальні дослідження проводилися на алюмінієвій пластині товщиною 3 мм, яка імітувала частину конструктивного елемента літака. У ділянках, де були розташовані отвори для заклепок, спостерігалися дві поверхневі тріщини довжиною 2.65 та 2.75 мм. Їх виявлення ускладнювалося через невеликі розміри дефектів і виражені крайові ефекти. Використання 16-ти елементної матриці дозволило ідентифікувати ці дефекти завдяки наявності двох чітких пікових значень у вихідному сигналі, які відповідали розташуванню тріщин.

Французька дослідницька група під керівництвом Marchand, Decitre та Casula провела роботу над створенням матриці, що складалася з двох рядів магніторезисторів по 11 елементів у кожному [19]. Розмір одного чутливого елемента становив 70x8 мкм, а відстань між ними дорівнювала 100 мкм. У результаті загальна чутлива зона матриці досягала 2.2 мм. На рисунку 2.3 представлено вигляд самої матриці, окремого чутливого елемента, а також ключові параметри 11 магніторезисторів, які застосовувалися у цій розробці.



**Рис. 2.3**

- а) окремий чутливий елемент матриці магніторезисторів;
- б) загальний вигляд матриці магніторезисторів;
- в) характеристики елементів магніторезистивної матриці.

Дослідження показали ефективність застосування матриці магніторезисторів для виявлення дефектів в алюмінієвій пластині. У першій серії експериментів було виявлено імітований дефект розміром 100x100x100 мкм<sup>3</sup>. Друга серія експериментів продемонструвала можливість визначення трьох різних дефектів, розташованих у схожій пластині, з розмірами

200x100x200 мкм<sup>3</sup>, 100x100x200 мкм<sup>3</sup> та 100x100x100 мкм<sup>3</sup>. В усіх випадках система забезпечила високу точність локалізації дефектів завдяки високому співвідношенню сигнал/шум.

Німецькі вчені Kreuzbruck, Neubauer, Pelkner та Reimund провели дослідження, спрямовані на вивчення можливостей магніторезисторів у виявленні дефектів різного походження. Було продемонстровано використання чутливого магніторезистивного елемента, підключеного за мостовою схемою, яка зображена на рисунку 2.4. Цей елемент має чутливу зону розміром 60x70 мкм, що дозволяє ефективно фіксувати магнітні аномалії, пов'язані з наявністю дефектів.

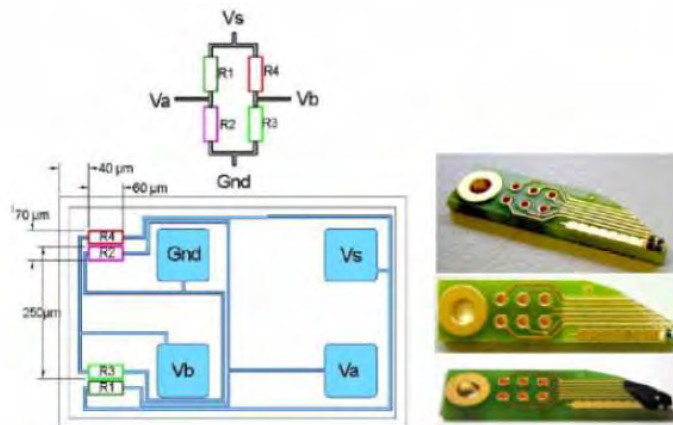


Рис. 2.4 Мостова схема підключення перетворювача

Під час випробувань магніторезистор перевіряли на здатність виявляти дефекти як на поверхні, так і під поверхнею залізної пластини, зразки якої мали різні геометричні параметри. Окремо тестували матеріали з втомленими ділянками, що містили дефекти, зумовлені багаторазовими навантаженнями. Успішно завершені експерименти дозволили розробити матрицю, яка включає 16 магніторезисторів. Її перевіряли на сталевій пластині, де дефекти залягали на різних глибинах: 42 мкм (під кутом 45°), 40 мкм, 70 мкм (довжиною 8 мм) та 170 мкм (довжиною 13 мм).

Крім того, є низка інших досліджень, у яких основна увага приділялася вивченню застосування магніторезистивних матриць для вирішення завдань неруйнівного контролю [21-25].

## 2.2 Структурна схема макету магнітної системи контролю, та її опис

Використовуючи дані теоретичних розробок, була створена магнітна система контролю, призначена для неруйнівного контролю бокових рам візків вантажних вагонів. Структурна схема цієї системи наведена на рисунку 2.5.

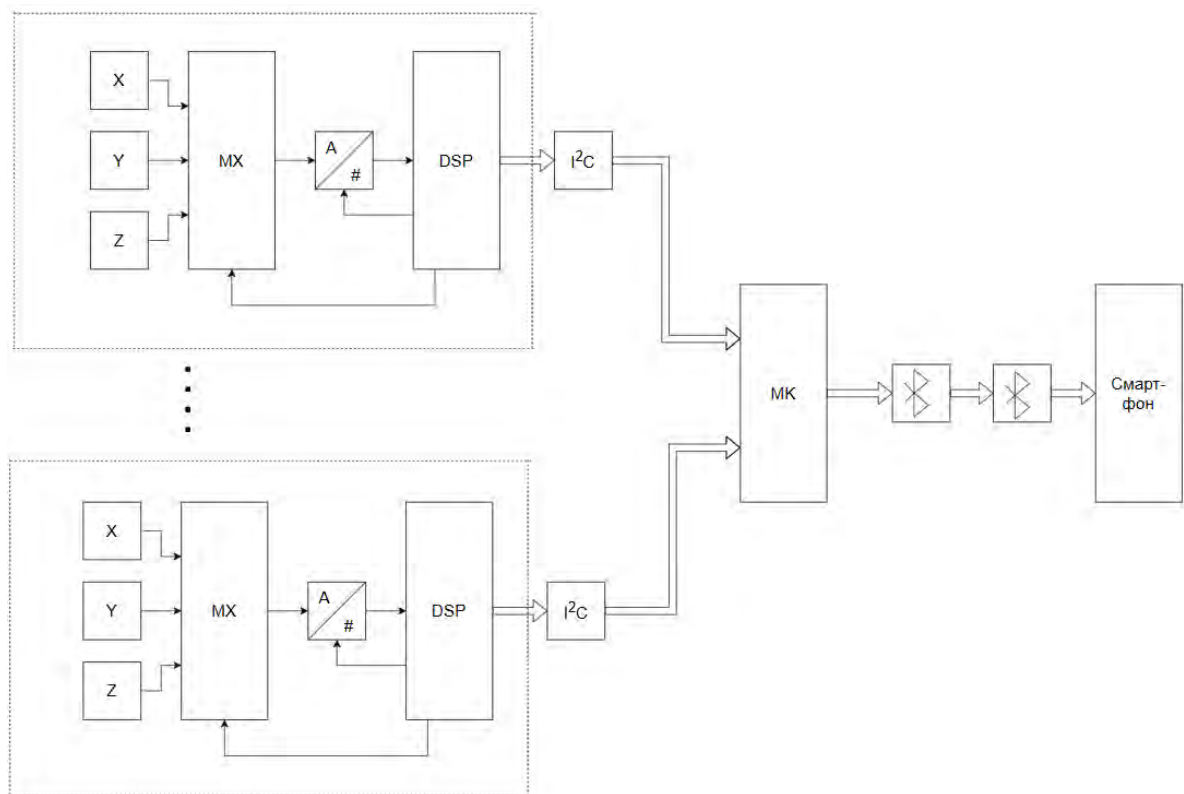


Рис. 2.5 Структурна схема магнітної системи неруйнівного контролю бокових рам візків вантажних вагонів.

Запропонована магнітна система контролю включає в себе магніторезистори MMC5603NJ, організовані у вигляді лінійної матриці, яка складається з 30 елементів. Кожен елемент забезпечує вимірювання компонентів напруженості магнітного поля у трьох взаємно перпендикулярних осях. Дані з магніторезисторів зчитуються через вбудований DSP-процесор із заданою частотою. Зібрані сигнали проходять

через мультиплексор, де відбувається їх упорядкування, та передаються на аналого-цифровий перетворювач (АЦП).

Оцифровані дані далі передаються до мікроконтролера STM32F103 за допомогою інтерфейсу I2C з частотою передачі до 400 кГц. У мікроконтролері виконується математична обробка сигналу, включаючи фільтрацію та аналіз. Оброблені результати передаються через Bluetooth-модуль на зовнішній пристрій, який виконує функції збереження отриманих даних та їх відображення на екрані для подальшого аналізу.

Такий підхід дозволяє з високою точністю і швидкістю проводити контроль бокових рам візків вантажних вагонів, виявляючи як поверхневі, так і підповерхневі дефекти.

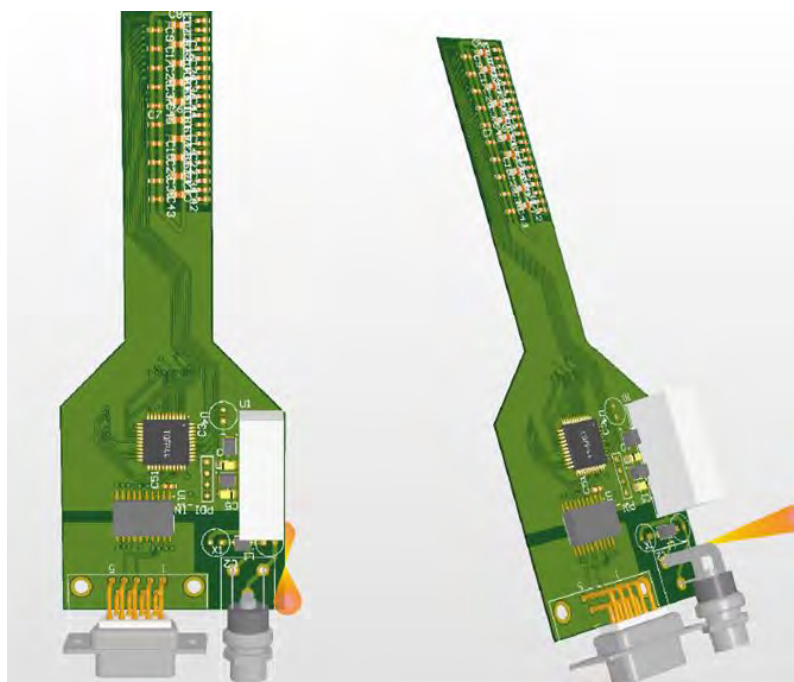


Рис. 2.6 Макет лінійної матриці перетворювачів, створений у програмному середовищі Altium Designer.

У процесі розробки макету магнітної системи контролю бокових рам візків вантажних вагонів використовувалося програмне забезпечення **Altium Designer**, яке є одним із провідних інструментів для проектування друкованих

плат (PCB). Це програмне забезпечення забезпечує високу точність моделювання, зручність інтеграції компонентів та ефективність створення складних електронних систем [32, 33].

Для проєктування макету системи в **Altium Designer** були реалізовані наступні етапи:

### 1. Створення електричної схеми:

- На початковому етапі була створена функціональна електрична схема, яка включає в себе всі основні компоненти: магніторезистори MMC5603NJ, мікроконтролер STM32F103, мультиплексор, Bluetooth-модуль та блок живлення.
- Схема забезпечує взаємозв'язок між компонентами через стандартний інтерфейс- I2C, UART тощо.

### 2. Розробка топології друкованої плати:

- Було створено багат шарову друковану плату з урахуванням розташування магніторезисторів у вигляді лінійної матриці.
- Трасування доріжок виконано з урахуванням цифрового характеру сигналу, який передається по шині I<sup>2</sup>C. Завдяки використанню цієї шини виключено необхідність забезпечення спеціальних умов для мінімізації шумів, характерних для аналогових сигналів [30, 33].
- Компактний форм-фактор плати обрано з урахуванням можливості її інтеграції в систему контролю, забезпечуючи ефективність розміщення та зручність експлуатації.

### 3. Оптимізація компонентів:

- Проведено розрахунок і вибір електронних компонентів, які забезпечують стабільну роботу системи в умовах змінних кліматичних обставин.

- Особливу увагу було приділено розташуванню магніторезисторів для забезпечення максимальної точності вимірювань.

#### 4. Симуляція роботи системи:

- Використовуючи вбудовані інструменти Altium Designer , була виконана перевірка роботи схеми.

#### 5. Генерація файлів для виробництва:

- Після успішної перевірки була виконана генерація гербер-файлів, необхідних для виготовлення друкованої плати.

Результатом проектування стала функціональна друкована плата, яка забезпечує роботу магнітної системи контролю. На рисунку 2.56 представлено приклад топології друкованої плати, спроектованої в Altium Designer.

### 2.3 Програма обробки та відображення результатів вимірювання

Математичні обчислення в магнітній системі контролю виконуються безпосередньо мікроконтролером, який приймає дані з магніторезисторів через інтерфейс I2C. Після обробки даних мікроконтролер передає результати на смартфон або інший пристрій за допомогою Bluetooth-з'єднання.

На стороні смартфона (або іншого приймаючого пристрою) розроблено програму, яка виконує такі основні функції:

- **Прийом даних по Bluetooth:** програмне забезпечення отримує оброблені дані з мікроконтролера.
- **Збереження даних:** Програмне забезпечення створено на мові Python (у випадку роботи на ПК) або може бути на іншій мові, залежно від обраної платформи (наприклад, Kotlin або Swift для мобільних додатків). Результати вимірювань автоматично зберігаються в пам'яті пристрою в форматі CSV для подальшого аналізу.

- **Візуалізація:** Основною функцією програми є реєстрація амплітуди магнітного поля, градієнтів та зміни знаку поля, а також індикація поточних значень у зручній формі для користувача. Інтерфейс програми зручний і інтуїтивно зрозумілий, включає:

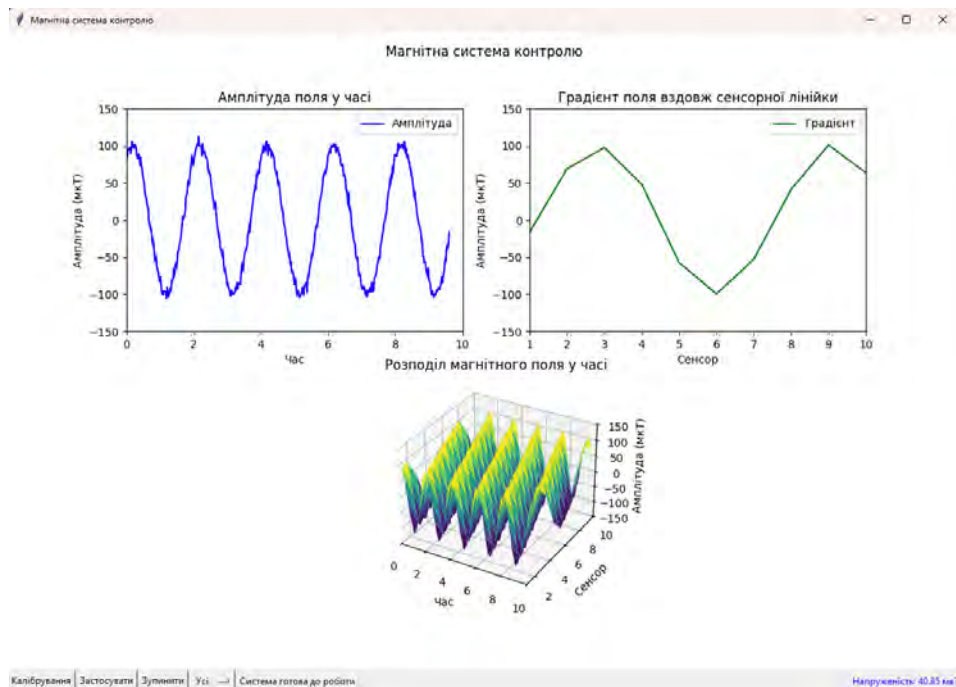


Рис. 2.7 – Інтерфейс програми

1. **Графік амплітуди поля у часі:** Реєструє зміну магнітного поля від першого датчика в режимі "автошкали". Завдяки автоматичному налаштуванню шкали по осях X (час) та Y (амплітуда) на графіку відображається динаміка зміни поля за обраний проміжок часу.
2. **Графік градієнта поля вздовж сенсорної лінійки:** Відображає розподіл поля між датчиками, де по осі X вказано номер датчика, а по осі Y – амплітуда в мкТ. Графік демонструє градієнт магнітного поля між усіма сенсорами в системі.
3. **3D-графік розподілу поля у часі:** Відображає зміну магнітного поля у просторі й часі. По осі X показаний час, по осі Y – номер датчика, а по осі Z – амплітуда магнітного поля в мкТ. Даний графік надає можливість візуалізувати динаміку змін магнітного поля у тривимірному форматі, що є корисним для аналізу просторових і часових аномалій.



4. **Кнопка "Зупинка програми"**: Зупиняє процес реєстрації та обробки даних, припиняючи оновлення всіх графіків.
5. **Кнопка "Застосувати калібрування"**: Активує збережені параметри калібрування для нівелювання природних неоднорідностей магнітного поля.
6. **Кнопка "Калібрування"**: Виконує процедуру нівелювання градієнтів природного поля для підвищення точності вимірювань.
7. **Меню вибору координат**: Дозволяє обрати для аналізу одну з компонент поля ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) або всі три разом. Для зручності використано кольорову індикацію: червона лінія для  $Z$ , зелена – для  $Y$ , синя – для  $X$ .
8. **Індикатор напруженості поля**: Відображає числове значення у мкТ для обраної компоненти поля від першого перетворювача. Індикація змінюється в реальному часі залежно від поточних даних.

Приклад інтерфейсу програми для відображення результатів вимірювання наведений на рисунку 2.7.

## **Висновок**

У даному розділі проведено аналіз сучасного стану використання магніторезисторів у системах неруйнівного контролю.

На основі проведених досліджень розроблено структурну схему магнітної системи контролю, яка складається з лінійної матриці з 10 магніторезисторів, що забезпечують вимірювання магнітного поля у трьох координатах. Передача даних між датчиками та мікроконтролером реалізована через інтерфейс I2C, що дозволяє ефективно обробляти отримані сигнали.

Програмне забезпечення для системи створено на мові Python. Реалізовано інтерфейс, який дозволяє відображати амплітуду магнітного поля у часі, градієнт поля вздовж матриці сенсорів та 3D-розподіл магнітного поля у часі. Передбачено можливість калібрування для підвищення точності вимірювань та вибору осей для аналізу даних.

Розроблено макет магнітної системи включає лінійну матрицю датчиків та ноутбук для візуалізації та збереження результатів вимірювань.

### **3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ У ПРОГРАМІ COMSOL MULTIPHYSICS**

#### **Вступ**

У неруйнівному контролі одним із ключових завдань є вивчення полів розсіювання, які утворюються в областях з дефектами. Ці поля надають можливість не лише виявити дефект, а й оцінити його глибину залягання, форму та розміри. Разом із тим, аналітичне обчислення таких полів є досить складним через складну геометрію дефектів, що їх утворюють.

Традиційно вирази для опису полів розсіювання отримують для конкретних, окремих випадків, базуючись на експериментальних дослідженнях. Втім, такі вирази є обмеженими у застосуванні та не охоплюють широкого спектра можливих дефектів. Це створює потребу в універсальному підході для моделювання полів розсіювання, що виникають над дефектами різної форми та розмірів.

У цьому розділі, для розв'язання цього завдання, використано програмний комплекс **COMSOL Multiphysics**, який дозволяє проводити тривимірне моделювання напруженості магнітного поля. Система рівнянь Максвелла, що описує ці процеси, розв'язується методом кінцевих елементів, що забезпечує точність та гнучкість підходу.

Для імітації дефектів використано геометричні моделі простої форми різних розмірів. Дефекти розташовувались як на поверхні, що відповідає тріщинам, так і в підповерхневих шарах, для моделювання внутрішніх пошкоджень. Це дозволяє оцінити просторові характеристики полів розсіювання залежно від форми, розміру та розташування дефекту,

створюючи наукове підґрунтя для практичного застосування неруйнівного контролю.

### 3.1 Визначення математичної моделі

Для областей, де струми збудження відсутні, справедливими є наступні співвідношення:

1. Рівняння безвихровості напруженості магнітного поля

$$\nabla \times H = 0 \quad (3.11)$$

Це рівняння описує, що у середовищах без струмів збудження магнітне поле  $H$  не має вихрової складової, а його лінії напруженості є потенціальними.

2. Визначення скалярного магнітного потенціалу:

$$H = -\nabla V_m \quad (3.1)$$

Напруженість магнітного поля може бути описана через скалярний магнітний потенціал  $V_m$ . Це вираз аналогічний електростатичному потенціалу, який використовується в теорії електростатичних полів.

3. Залежність між магнітною індукцією та напруженістю поля:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (3.2)$$

Магнітна індукція  $B$  визначається через напруженість магнітного поля  $H$ , намагніченість  $M$  та магнітну проникність.

4. Рівняння безперервності магнітного потоку:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.3)$$

Це співвідношення демонструє збереження магнітного потоку та відсутність магнітних монополів.

5. Рівняння для скалярного магнітного потенціалу:

$$-\nabla \cdot (\mu_0 \nabla V_m - \mu_0 M_0) = 0 \quad (3.4)$$

Це є основним рівнянням для розв'язання задач моделювання магнітних полів. Воно визначає розподіл потенціалу  $V_m$  у просторі та враховує внесок намагніченості  $M_0$ .

6. Граничні умови:

Для симетричної межі: магнітне поле є тангенціальним до межі:

$$n \cdot (\mu_0 \nabla V_m - \mu_0 M_0) = n \cdot B = 0 \quad (3.5)$$

Це забезпечує безперервність тангенціальних компонент магнітного поля.

Для несинхронної межі: магнітне поле є перпендикулярним до поверхні:

$$B_n = \text{const.}$$

Це визначає сталість нормальної складової магнітної індукції  $B_n$  та забезпечує сталість скалярного магнітного потенціалу.

Рівняння (3.5) разом із граничними умовами (3.6) складають базу для чисельного моделювання в COMSOL Multiphysics і дозволяють аналізувати розподіл магнітного поля в області із дефектами.

### 3.2 Макет для експериментального вивчення магнітних збурень

У середовищі Comsol Multiphysics була розроблена модель для виконання експериментальних досліджень магнітних полів у зонах, де присутні дефекти. Конструкція включає постійний магніт, який створює початкове магнітне поле, і залізну пластину, що служить основою для імітації дефектів. Такий підхід дозволяє аналізувати вплив дефектів на розподіл магнітного поля та досліджувати особливості взаємодії магнітного поля з матеріалом, забезпечуючи нові можливості для неруйнівного контролю.

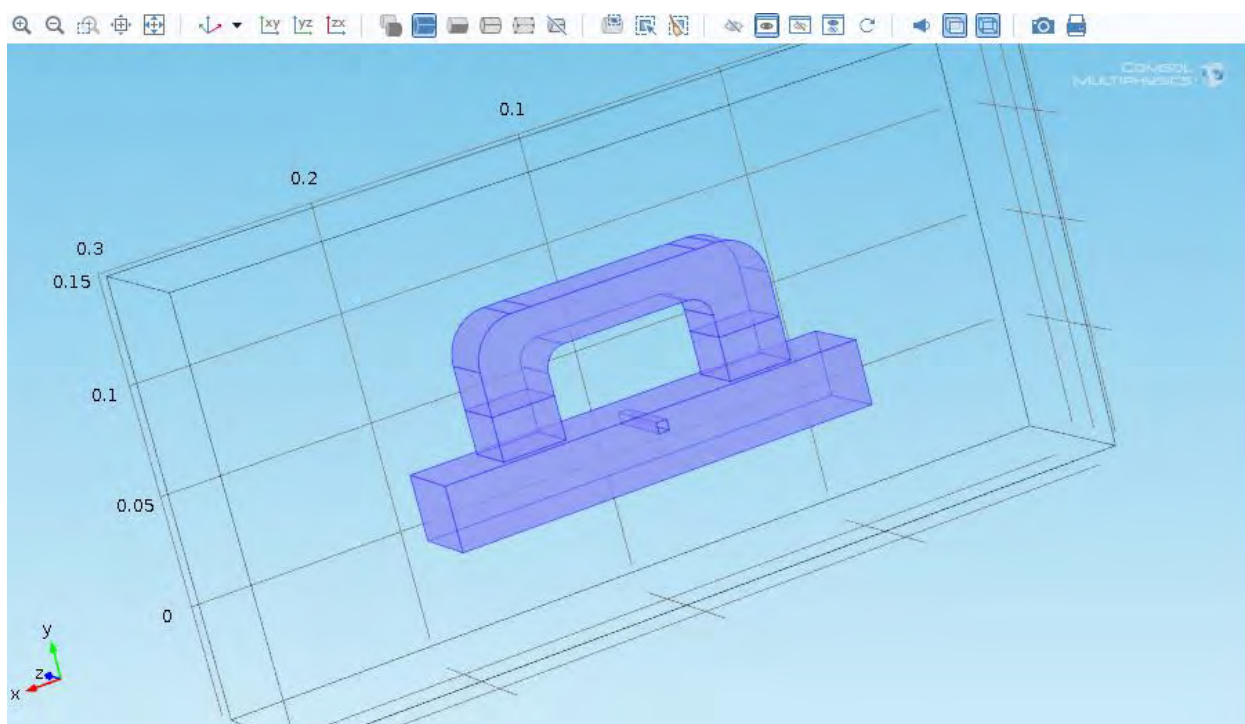


Рис. 3.1 Геометрична модель для аналізу полів збурення під час експериментальних досліджень

Для намагнічування використовується П-подібний постійний магніт, виготовлений із заліза, характеристики якого взяті зі стандартної бібліотеки Comsol Multiphysics. Полюси магніту створюють постійне магнітне поле з напруженістю 1000 А/м. База магніту має довжину 140 мм. Пластина моделюється у формі паралелепіпеда з розмірами 200×30×40 мм, при цьому її фізичні властивості також взяті зі стандартної бібліотеки Comsol Multiphysics.

### 3.3 Моделювання поверхневих тріщин

Зважаючи на високу ймовірність утворення поверхневих тріщин у конструкційних елементах бокової рами, проведення моделювання з імітацією таких дефектів у металевій пластині є обґрунтованим. Для цього використовується паралелепіпед як модель дефекту, при цьому одна з його бокових граней виходить на поверхню пластини. На рисунку 3.2 зображено розсіювальне поле, яке виникає в зоні поверхневого дефекту.

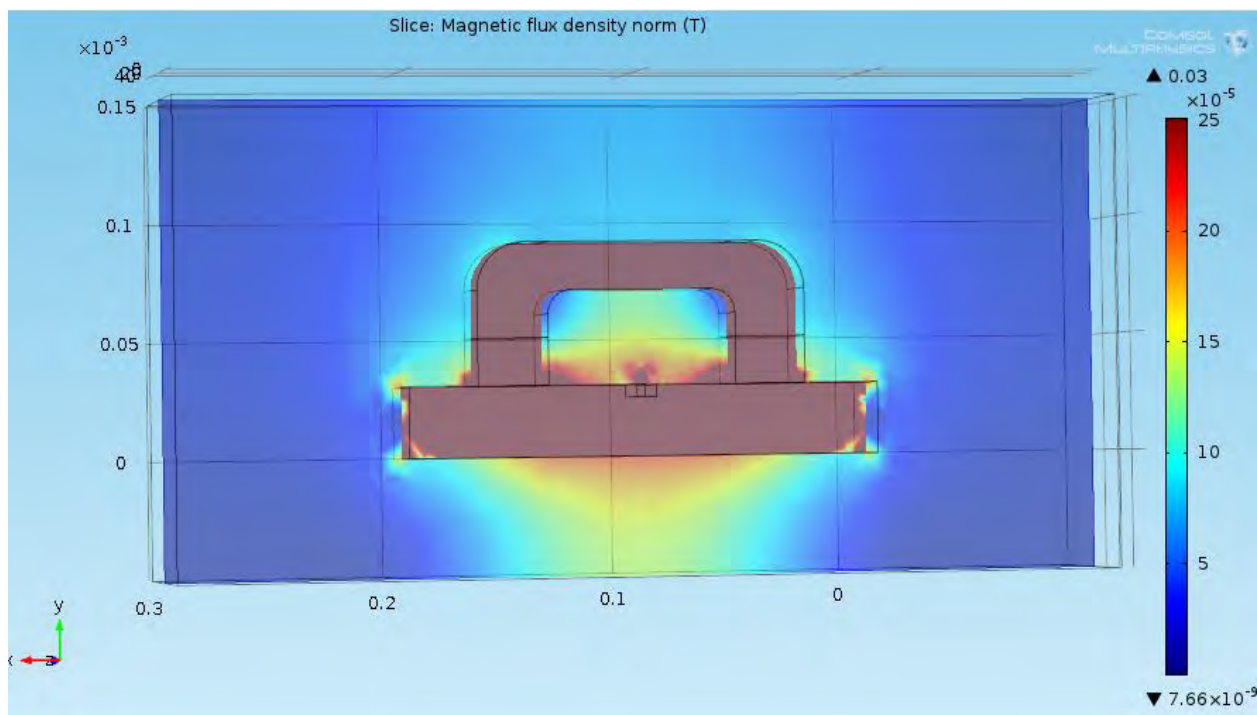


Рис. 3.2 Розподіл поля розсіювання в зоні поверхневого дефекту розміром 5x5 мм.

Оскільки виявлення дефектів малих розмірів має велике значення, було проведено дослідження полів розсіювання для поверхневих тріщин з розмірами 1x1 мм, 2x2 мм та 5x5 мм. Вимірювання значень магнітного поля здійснювалося як безпосередньо на поверхні зразка, так і на певній відстані від нього.

На рисунку 3.3 зображені розподіли магнітного поля розсіювання, що виникає над дефектом розміром 1x1 мм, на різних відстанях від його поверхні.

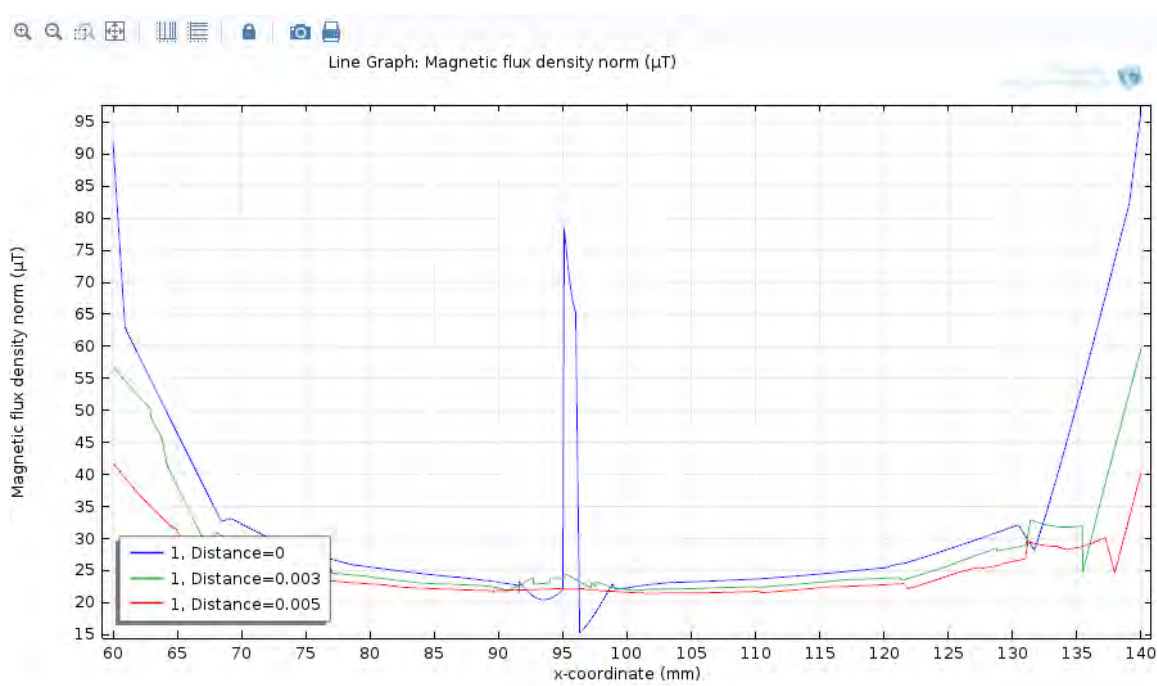


Рис. 3.3 Магнітне поле розсіювання, створене дефектом з розмірами 1x1 мм, на відстанях 0 мм, 3 мм та 5 мм від поверхні зразка відповідно.

На представленому графіку показано розподіл магнітного поля розсіювання над дефектом розміром 1x1 мм на різних відстанях від поверхні: синя крива відповідає вимірюванням безпосередньо на поверхні зразка (Distance=0), зелена – на відстані 3 мм (Distance=0.003), а червона – на відстані 5 мм (Distance=0.005).

Аналіз графіка демонструє, що на поверхні зразка (синя крива) поле розсіювання має найбільше значення з піковим значенням близько 78 мкТ, тоді як на відстані 3 мм (зелена крива) ці значення помітно згладжуються, а на

відстані 5 мм (червона крива) градієнт практично зникає. Це вказує на те, що для ефективного виявлення дефектів такого розміру сенсори мають розташовуватися максимально близько до контрольованої поверхні.

Таким чином, для забезпечення високої точності вимірювань при визначенні дефектів розміром 1x1 мм, рекомендована відстань між магнітними сенсорами не повинна перевищувати 1 мм. Це дозволить досягти максимальної достовірності контролю та виявляти дефекти навіть на мінімальних відстанях.

На рисунку 3.4 зображено поле розсіювання, сформоване над поверхневою тріщиною з геометричними розмірами 2x2 мм. Для кращого розуміння розподілу поля було обрано площину поперечного перерізу, яка розташована безпосередньо на поверхні контрольованого об'єкта. Це дозволяє чітко побачити зміни інтенсивності магнітного поля в області дефекту.

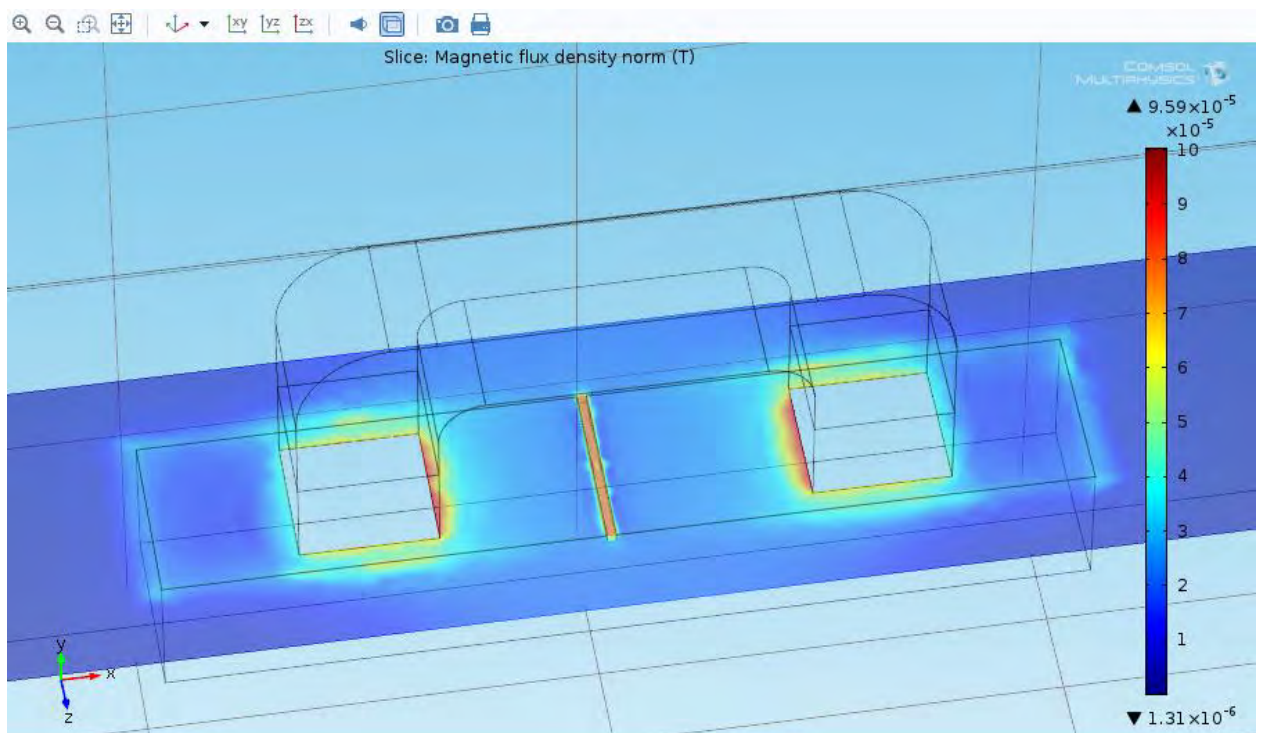
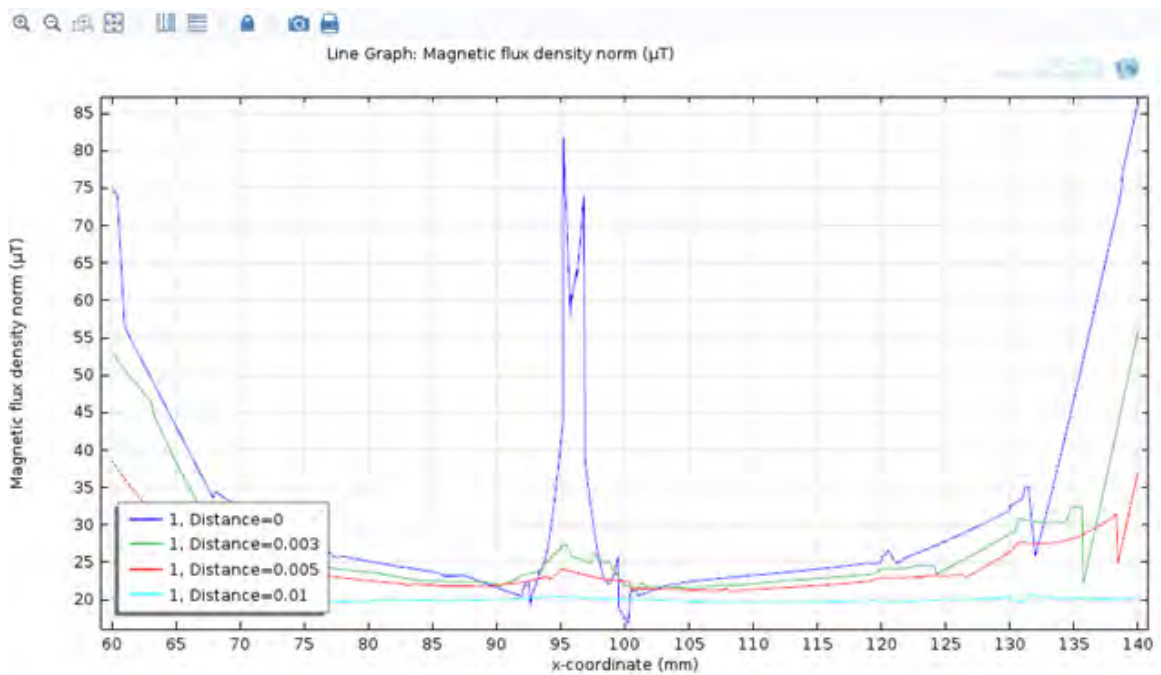


Рис. 3.4 Поле розсіювання, сформоване над дефектом розміром 2x2 мм у площині перерізу, розташованій на поверхні зразка.

На рисунку 3.5 представлено значення магнітного поля розсіювання, що виникає над дефектом розміром 2x2 мм на різних відстанях від поверхні: 0 мм, 3 мм, 5 мм та 10 мм.

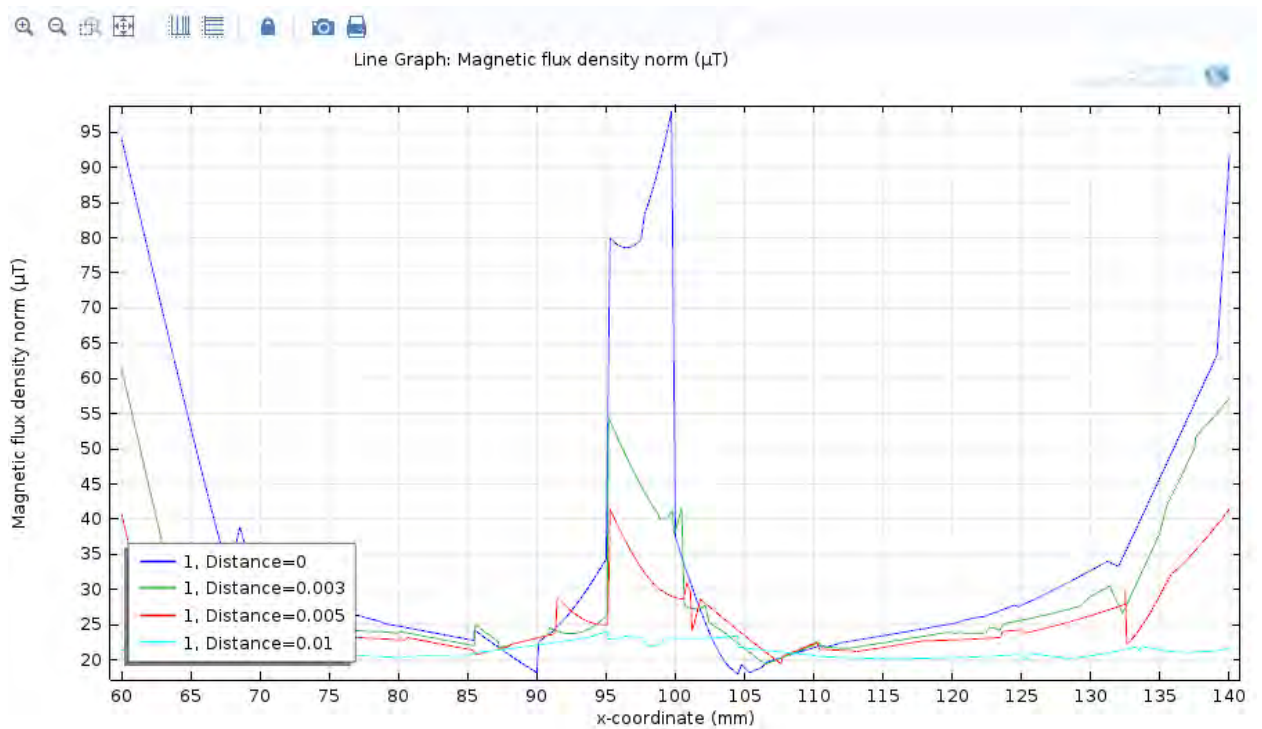


**Рис. 3.5.** Поле розсіювання, яке виникає над дефектом розміром 2x2 мм на відстанях 0 мм, 3 мм, 5 мм і 10 мм від поверхні.

Крива 1 відповідає магнітному полю розсіювання безпосередньо на поверхні, крива 2 – на відстані 3 мм, крива 3 – на 5 мм, а крива 4 – на 10 мм. З аналізу отриманих даних видно, що градієнт поля для кривої 1 змінюється від 23 мкТ до 83 мкТ, що становить 60 одиниць. Для кривої 2 зміна градієнта складає 8 одиниць, а для кривої 3 – лише 4 одиниці. На відстані 10 мм градієнт магнітного поля значно зменшується і прямує до нуля, що унеможливорює ідентифікацію дефекту такого розміру. Таким чином, для забезпечення високої точності контролю мінімальна відстань між магніторезистивними перетворювачами повинна бути не більшою за 3 мм.

На рисунку 3.6 зображено значення магнітного поля розсіювання, яке виникає над дефектом розміром 5x5 мм на різних відстанях: 0 мм, 3 мм, 5 мм та 10 мм від поверхні зразка.





**Рис. 3.6.** Поле розсіювання, що утворюється над дефектом розміром 5x5 мм на відстанях 0 мм, 3 мм, 5 мм і 10 мм.

Крива 1 відповідає магнітному полю розсіювання на поверхні, крива 2 – на відстані 3 мм, крива 3 – 5 мм, а крива 4 – 10 мм. З отриманих даних видно, що на поверхні дефекту (крива 1) поле змінюється від 23 мкТ до 98 мкТ, що відповідає градієнту в 75 одиниць. Для кривої 2 (на відстані 3 мм) зміна градієнта складає 27 одиниць, а для кривої 3 (5 мм) – 24 одиниці. При відстані 10 мм (крива 4) градієнт поля розсіювання прямує до нуля, що унеможливорює визначення дефекту на такій відстані. Для забезпечення високої точності контролю дефекту розміром 5x5 мм відстань між магніторезистивними перетворювачами повинна бути меншою за 5 мм.

### 3.4 Моделювання під поверхневих тріщин

Оскільки в більшості випадків бракувальний рівень дефектів не перевищує розмірів 2x2 мм, для моделювання полів розсіювання підповерхневих дефектів було обрано саме цей розмір. На рисунку 3.7 представлено металеву пластину, яка виступає об'єктом контролю. У пластині імітовано три підповерхневих

дефекти, розташовані на різних глибинах: 1 мм, 2 мм та 3 мм від поверхні відповідно.

Такий підхід дозволяє оцінити вплив глибини залягання дефекту на розподіл магнітного поля та визначити межі чутливості магнітної системи контролю до виявлення дефектів з мінімальними геометричними розмірами.

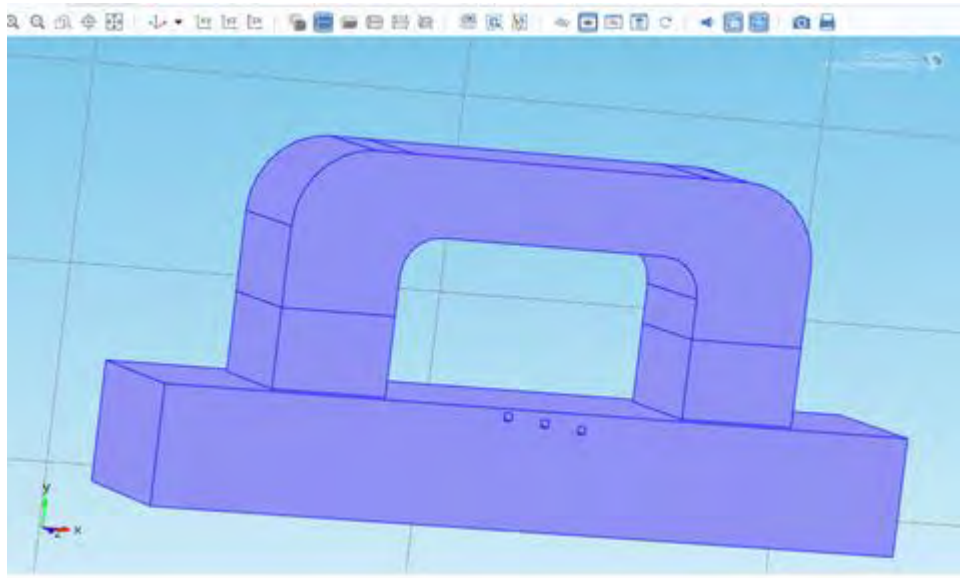


Рис. 3.7. Металева пластинка з трьома підповерхневими дефектами розміром 2x2 мм, розташованими на відстані 1, 2 та 3 мм від поверхні.

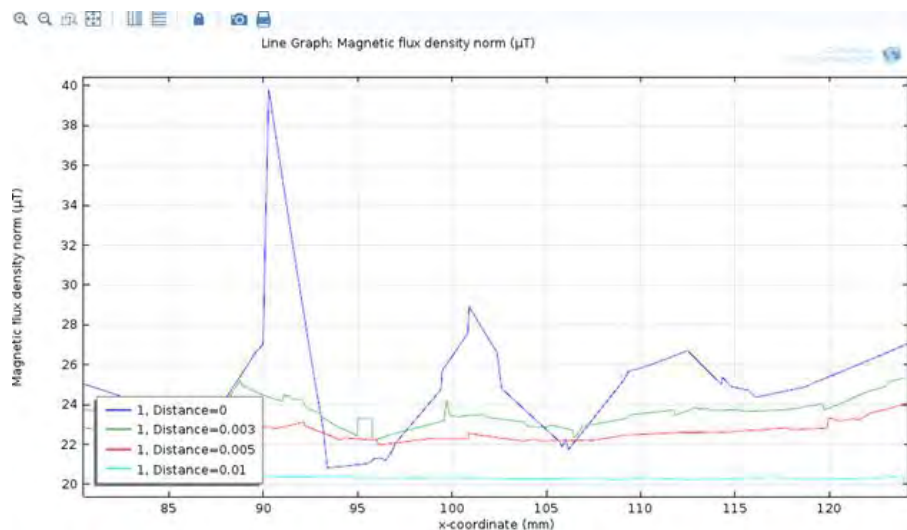


Рис. 3.8. Графічне відображення полів розсіювання, отриманих для дефекту розміром 2x2 мм, розташованого на глибині 1, 2 та 3 мм, з

вимірюваннями на поверхні, а також на відстані 3, 5 та 10 мм від поверхні.

Як видно з рисунку 3.8, максимальний сигнал на поверхні отримано для дефекту, що залягає на глибині 1 мм. У цьому випадку градієнт магнітного поля змінюється в діапазоні від 23 мкТ до 38 мкТ, що становить 15 одиниць. Для дефектів, які розташовані на глибині 2 мм і 3 мм, відповідні значення градієнта зменшуються до 7 і 4 одиниць. З аналізу представлених графіків можна зробити висновок, що навіть при вимірюванні на відстані 3 мм і 5 мм від поверхні зразка зміни поля залишаються чітко визначеними. Лише для дефекту на глибині 3 мм виникають труднощі у фіксації градієнту, оскільки його значення незначне і складає лише кілька одиниць.

Зважаючи на те, що для досліджень зазвичай застосовуються стандартні зразки, прийняті на підприємствах, доцільно виконати додаткове моделювання полів розсіювання у металевій пластині з отворами діаметром 3 мм, розташованими на різних глибинах. Зовнішній вигляд такої пластини з отворами різної глибини залягання представлено на рисунку 3.9.

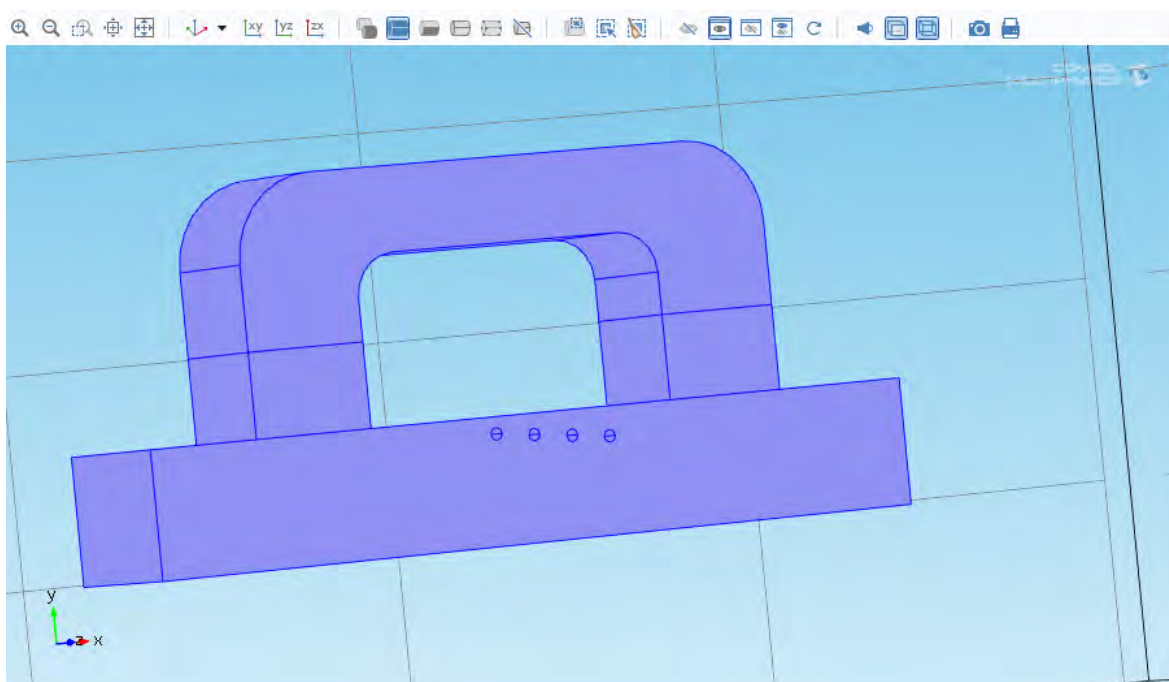


Рис. 3.9 Металева пластинка з отворами діаметром 3 мм, що знаходяться на глибині 1, 2, 3 та 4 мм відповідно.

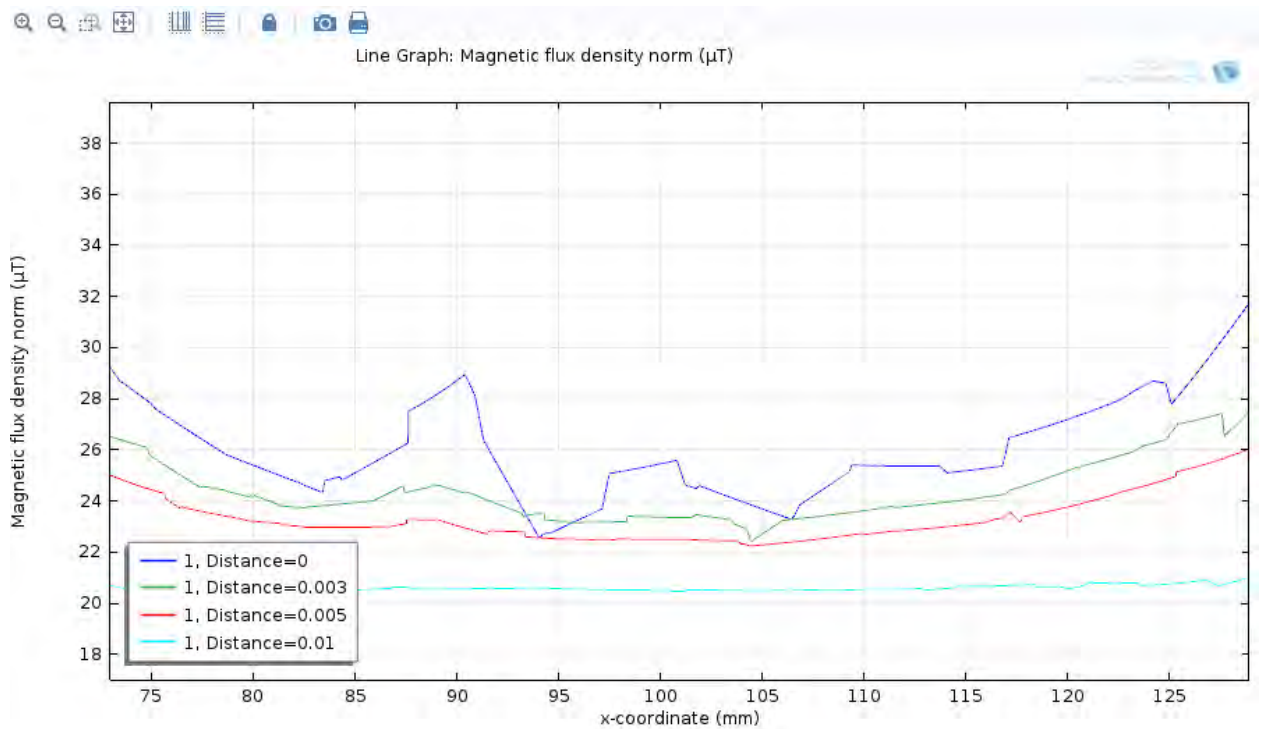


Рис. 3.10 Магнітне поле розсіювання, що виникає над отворами, що розташовані на глибині залягання 1, 2, 3 та 4 мм відповідно.

Аналізуючи графік 3.10, можна зробити висновок, що найбільше значення поля розсіювання фіксується безпосередньо на поверхні об'єкта контролю. Наприклад, для першого отвору, розташованого на глибині 1 мм, значення градієнту змінюється в межах від 23 мкТ до 29 мкТ, що становить 6 одиниць. При збільшенні відстані до 3 мм або 5 мм від поверхні об'єкта визначення градієнту поля стає більш ускладненим. Варто зазначити, що на відстані 10 мм градієнт практично не фіксується, оскільки його значення наближається до нуля.

### 3.5. Моделювання секції бокової рами з підповерхневим дефектом

Деякі елементи бокової рами вантажних вагонів мають складну просторову геометрію. На рисунку 3.11 зображено макет подібної конструктивної частини. Цей елемент виконаний у формі циліндра з вигином

під кутом  $90^\circ$ . У зоні вигину знаходиться підповерхневий дефект, змодельований у вигляді паралелепіпеда розмірами  $2 \times 2 \times 10$  мм.

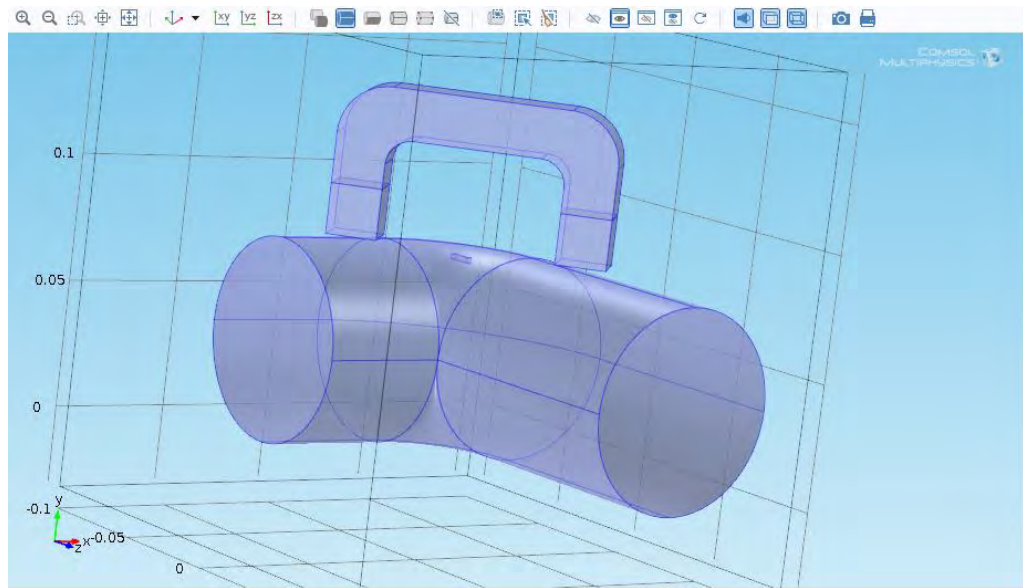


Рис. 3.11 Макет конструктивного елемента бокової рами з підповерхневим дефектом.

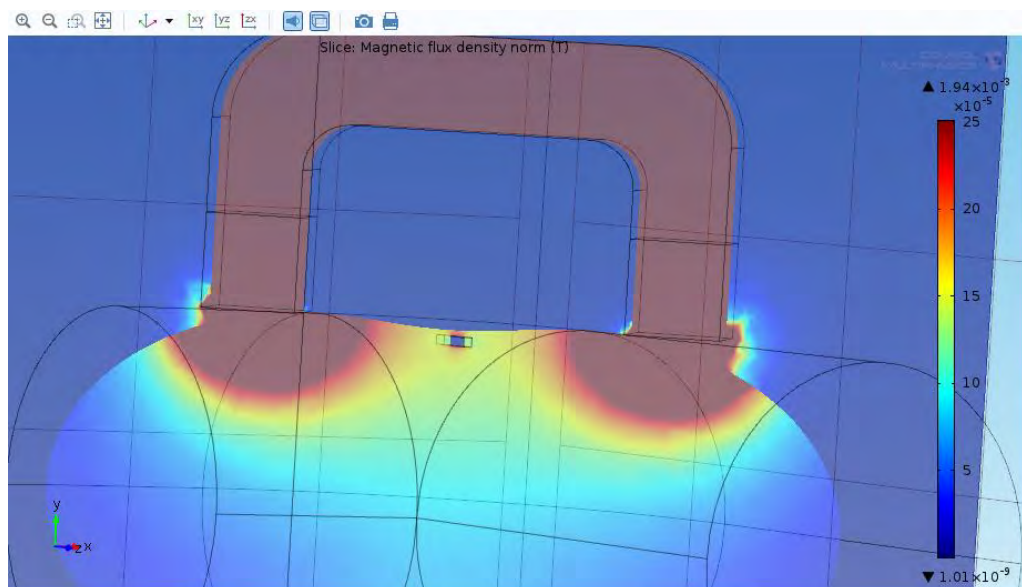


Рис. 3.12 Поле розсіювання, що утворюється в зоні підповерхневого дефекту.

Варто зауважити, що найбільша концентрація магнітного поля спостерігається безпосередньо над і під дефектом, що чітко відображено кольоровою палітрою.

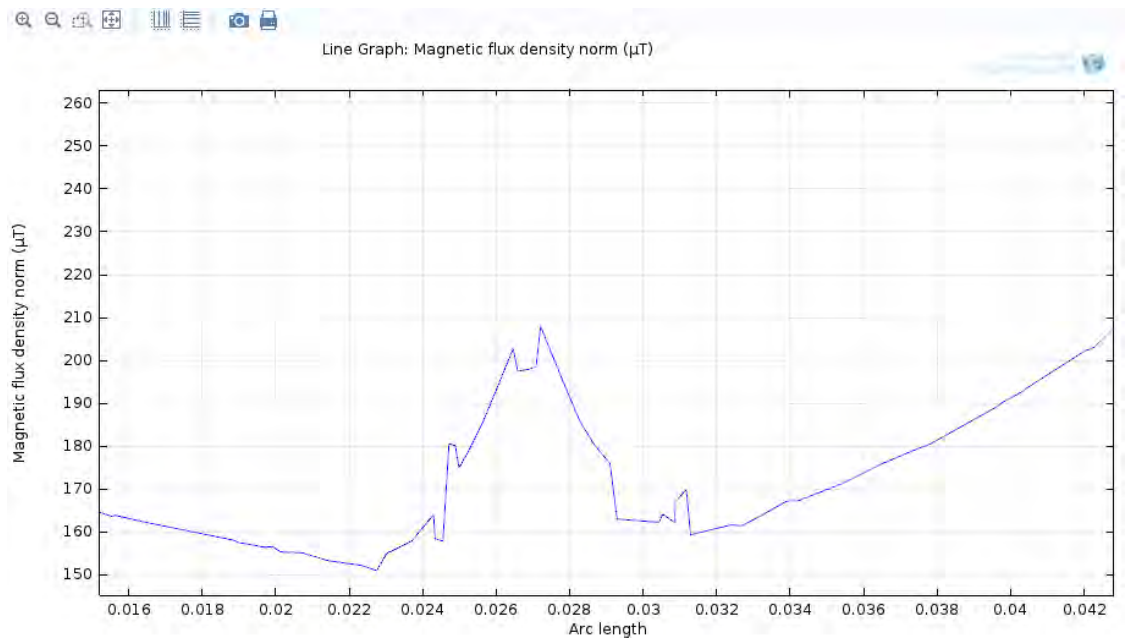


Рис. 3.13 Магнітне поле розсіювання на поверхні зразка бокової рами, яке виникає в області розташування підповерхневого дефекту.

На рисунку зображено магнітне поле розсіювання, що формується на поверхні контрольованого зразка. В зоні розташування дефекту спостерігається зміна величини магнітного поля в діапазоні від 160 до 205 мкТ, що відповідає градієнту зміни у 45 одиниць.

### Висновки

У цьому розділі виконано моделювання магнітних полів розсіювання, що виникають у результаті наявності поверхневих і підповерхневих дефектів, за допомогою програмного середовища Comsol Multiphysics. У ролі об'єкта контролю використовувалася залізна пластина, де дефекти моделювалися у вигляді геометричних елементів. Для намагнічування застосовувався постійний магніт з базою 140 мм і напруженістю магнітного поля 1000 А/м.

У процесі моделювання було досліджено особливості полів розсіювання для дефектів різних типів. Поле розсіювання аналізувалося як на поверхні зразка, так і на відстанях 3, 5 і 10 мм від неї. Результати показали, що над дефектами спостерігається різка зміна градієнта напруженості магнітного поля, тоді як при віддаленні від дефектів амплітуда поля значно знижується.

## 4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «МАГНІТНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ БОКОВИХ РАМ ВІЗКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ ВАГОНІВ»

### 4.1. Опис ідеї проєкту технології

У цьому розділі проведено аналіз стартап-проєкту, мета якого полягає у розробці магнітної системи контролю бокових рам візків залізничних вагонів. Система спрямована на автоматичний моніторинг технічного стану рам із використанням магнітних сенсорів, що забезпечує високоточне виявлення дефектів та аномалій, що можуть вплинути на безпеку залізничних перевезень.

Ідея проєкту полягає в створенні сучасної магнітної системи, здатної виявляти різні види дефектів, як поверхневих, так і підповерхневих, у реальному часі. Це дозволяє швидко реагувати на виникнення пошкоджень, що знижує ризики аварій і підвищує ефективність технічного обслуговування залізничного транспорту. Система складається з магнітних сенсорів, які встановлюються на візках вагонів та під'єднані до центрального блоку обробки даних, що забезпечує аналіз отриманих сигналів і виявлення можливих аномалій.

Перед розглядом деталей реалізації проєкту, нижче представлена інформаційна карта, що описує основні характеристики проєкту, проблематику, яку він вирішує, та цілі, які стоять перед командою.

Таблиця 4.1 - Інформаційна картка

Назва блоку	Характеристика
Назва стартап-проєкту	Магнітна система контролю бокових рам візків залізничних вагонів
Проблематика, яку вирішує стартап-проєкт	Стартап вирішує проблему забезпечення безпечної експлуатації залізничних вагонів, контролюючи технічний стан бокових рам, які є ключовими конструкційними елементами. Завдяки постійному моніторингу стану рам можливо уникнути аварійних ситуацій, викликаних пошкодженнями чи зносом рам, що забезпечує підвищення надійності перевезень та зменшення витрат на ремонт.

Головні цілі та завдання проекту	<p><b>Мета проекту</b> – розробка автоматизованої системи моніторингу бокових рам залізничних вагонів для підвищення безпеки та ефективності експлуатації.</p> <p><b>Завдання проекту:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Впровадження магнітної системи моніторингу на залізничних підприємствах.</li> <li>2. Розробка програмного забезпечення для збору та аналізу даних про стан рам.</li> <li>3. Підвищення точності та ефективності контролю завдяки автоматизації процесу виявлення дефектів.</li> <li>4. Забезпечення можливості оперативного реагування на виявлені дефекти.</li> </ol>
Головні цільові групи, на які спрямований проект	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Залізничні оператори та компанії-перевізники – компанії, що займаються експлуатацією залізничних вагонів і потребують надійного контролю технічного стану для забезпечення безпеки перевезень.</li> <li>2. Залізничні ремонтні депо та технічні підприємства – підприємства, що займаються ремонтом та обслуговуванням залізничного транспорту, яким потрібні інструменти для діагностики стану бокових рам для підвищення ефективності ремонтних робіт.</li> <li>3. Транспортні компанії та логістичні оператори – компанії, які використовують залізничні вагони для транспортування вантажів і зацікавлені у зменшенні ризику аварій та підвищенні надійності доставки.</li> <li>4. Виробники залізничного обладнання – компанії, що виробляють та постачають залізничне обладнання, і можуть інтегрувати систему контролю у свої виробниці як частину комплексного рішення.</li> </ol>
<b>Автори та команда стартап-проекту</b>	
Автори стартап-проекту	Рудов Ярослав Дмитрович Баженов Віктор Григорович
Команда стартап-проекту	Рудов Ярослав Дмитрович, Баженов Віктор Григорович інвестори; керівники; працівники-дизайнери; інженери; фахівці з технічного обслуговування та програмісти.
Опис продукту стартап-проекту	
Назва та коротка характеристика мінімального життєздатного продукту стартапу (MVP)	"Magnetic Frame Monitor" — це мінімально життєздатний продукт для автоматизованого моніторингу технічного стану бокових рам візків залізничних вагонів. Система оснащена базовими магнітними сенсорами для виявлення дефектів, що можуть призвести до аварійних ситуацій. "Magnetic Frame Monitor" забезпечує початкові функції контролю та сповіщення у випадку виявлення критичних відхилень, що дозволяє своєчасно реагувати на пошкодження та підвищити безпеку перевезень.
Сфера застосування та функціональне призначення продукту	"Magnetic Frame Monitor" призначений для використання на підприємствах, що експлуатують та обслуговують залізничний транспорт. Система забезпечує надійний автоматизований моніторинг бокових рам, знижуючи ймовірність аварій та покращуючи ефективність технічного обслуговування залізничних вагонів.



Опис унікальних властивостей продукту стартапу	Унікальні властивості "Magnetic Frame Monitor" включають високу точність виявлення дефектів завдяки магнітним сенсорам, компактність та легкість інтеграції в існуючу інфраструктуру. Система дозволяє проводити моніторинг без втручання людини, що мінімізує вплив людського фактора та значно підвищує надійність діагностики.
Стадія розробки продукту стартапу	Розробка прототипу завершена, проведено тестування на експериментальній базі. На даний момент налагоджується співробітництво з залізничними підприємствами України для впровадження системи в реальні умови експлуатації, з подальшими планами масштабування на міжнародний ринок.
Технічні характеристики	"Magnetic Frame Monitor" — це компактна система для автоматизованого моніторингу стану бокових рам залізничних вагонів. Вона оснащена магнітними сенсорами, що дозволяють виявляти дефекти та знос в реальному часі. Система базується на вбудованих мікроконтролерах з можливістю обробки даних локально або передачею на сервер для подальшого аналізу. "Magnetic Frame Monitor" забезпечує надійний моніторинг стану бокових рам та знижує ризики аварій завдяки своєчасному виявленню проблем.
Супровід продукту	У разі виникнення несправностей користувачі можуть скористатися безкоштовним сервісним обслуговуванням у технічних центрах компанії. Додатково доступне планове технічне обслуговування системи для перевірки її справності, яке рекомендується проводити щорічно для забезпечення належного функціонування системи.
Забезпечення стартап-проекту	
Необхідні ресурси	На першому етапі необхідні магнітні сенсори, контролери та плата для зборки модулів, а також фінансове забезпечення у розмірі 500 000 грн для витрат на виробництво прототипів, тестування та просування продукту на ринку.
Потреба в інвестиціях	На початкових етапах розвитку проекту "Magnetic Frame Monitor" доцільно використовувати краудфіндингові платформи, такі як Kickstarter, для залучення фінансування і привернення уваги до інноваційної системи моніторингу. Також планується залучення приватних інвесторів, зацікавлених у підвищенні безпеки залізничного транспорту.
Інтелектуальна власність	Усі майнові авторські права на дизайн системи, сенсори, програмне забезпечення, креслення, технічні документи та відеоматеріали належать авторам стартапу "Magnetic Frame Monitor". Всі результати роботи захищені відповідно до чинного законодавства про авторське право.
Результати стартап-проекту	
Термін реалізації стартап-проекту	Термін реалізації стартап-проекту "Magnetic Frame Monitor" становить 18 місяців, що включає розробку перших прототипів системи, тестування, налаштування виробництва та вихід на ринок.
Плановані кількісні показники стартап-проекту	Плановані кількісні показники стартап-проекту "Magnetic Frame Monitor" передбачають випуск 500 одиниць прототипів протягом першого року, із подальшим запуском серійного виробництва та виходом на ринок України. У подальшому можливе розширення на міжнародний ринок протягом наступних 24 місяців.
Якісні показники стартап-проекту	Якісні показники стартап-проекту "Magnetic Frame Monitor" включають підвищення безпеки залізничних перевезень за рахунок своєчасного виявлення дефектів та запобігання аварійним ситуаціям. Система забезпечує високий рівень автоматизації процесу, що знижує вплив людського фактора та забезпечує надійну роботу без зупинок.

Загальні очікувані результати	Загальні очікувані результати стартап-проєкту включають успішне впровадження системи на залізничних підприємствах України, зменшення аварійності та підвищення безпеки перевезень. Успішний запуск на внутрішньому ринку створить платформу для подальшого виходу на міжнародні ринки.
-------------------------------	--

На основі інформації, наведеної в таблицях, можна зробити висновок, що повний цикл реалізації стартап-проєкту "Magnetic Frame Monitor" займе приблизно 18 місяців. Цей термін обумовлений необхідністю виконати ключові етапи розробки: залучення інвесторів, створення прототипу, проведення тестувань, налаштування виробництва та підготовку продукту до виходу на ринок. Така тривалість дозволяє гарантувати належну якість продукту, ефективність його роботи та відповідність усім вимогам безпеки.

Для прийняття найефективніших рішень у процесі проєктування системи було вирішено скористатися методом створення "морфологічної карти", яка допомагає знайти оптимальні рішення для кожного з компонентів системи. У таблиці 4.2 представлено результати цієї роботи.

Таблиця 4.2 - Морфологічна карта стартап-проєкту "Magnetic Frame Monitor"

Параметри	Проміжні рішення				
	1-ше рішення	2-ше рішення	3-тє рішення	4-тє рішення	5-тє рішення
Кількість сенсорів	1 сенсор	2 сенсори	3 сенсори	Індивідуальна настройка	10 сенсорів для більшого покриття
Тип сенсорів	Магнітні сенсори	Камери для виявлення тріщин	Ультразвукові сенсори	Сенсори на основі резистивності	Лазерні датчики
Розташування	На бокових рамах	На осі візка	Усередині конструкції	Зовнішнє розташування на вагоні	На підрамнику
Механізм фіксації	Приклеювання	Болтове кріплення	Магнітне кріплення	Монтаж на раму	Кліпсове кріплення
Тип інтерфейсу	Бездротовий	Дротове підключення	Гібридний варіант	Передача даних через сервер	Інше
Енергопостачання	Від акумулятора	Сонячні батареї	Підключення до вагонної мережі	Енергозбереження (сплячий режим)	Генератор на основі руху

Відповідно до морфологічної карти проєкту "Magnetic Frame Monitor", оптимальні рішення для безпосередньої розробки модуля визначаються наступним чином:

1. Кількість сенсорів:  $>3 \leq 10$  сенсори.
2. Тип сенсорів: Магнітні сенсори.
3. Механізм фіксації модуля: Магнітне кріплення на раму вагону.
4. Тип інтерфейсу: Гібридний варіант (бездротовий Wi-Fi та дротове підключення).

Таким чином, оптимальним рішенням є використання трьох магнітних сенсорів, що дозволяє покрити більшу площу бокових рам і підвищити надійність діагностики. Модуль буде закріплено за допомогою магнітного кріплення, що дозволяє швидко встановлювати та демонтувати його для технічного обслуговування. Гібридний інтерфейс забезпечує стабільну передачу даних як через дротове підключення, так і за допомогою бездротової мережі, що підвищує зручність використання системи.

Для більш ретельного розгортання концепції стартап-проєкту, ми визначилися зі створенням таблиці, в якій визначено сфери застосування та вигоди від використання модулю для кінцевого користувача (див. Таблицю 4.3).

Таблиця 4.3 - Опис ідеї стартап-проєкту "Magnetic Frame Monitor"

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Автоматизований модуль моніторингу стану бокових рам	Автоматизований моніторинг стану бокових рам під час експлуатації	Забезпечення своєчасного виявлення дефектів та зниження ризику аварій
	Планові огляди та технічне обслуговування	Підвищення надійності та безпеки залізничного транспорту
	Використання під час ремонту вагонів	Зниження витрат на технічне обслуговування
Інтеграція з іншими системами моніторингу	Інтеграція з існуючими системами безпеки та аналізу даних	Оптимізація процесу контролю та зручність використання

Віддалений доступ до даних та звітності	Віддалене управління та контроль стану рам	Можливість оперативного реагування на виникнення дефектів
	Збереження даних для подальшого аналізу	Забезпечення надійного зберігання інформації для аналізу стану вагонів

Відповідно до таблиці 4.3, система моніторингу "Magnetic Frame Monitor" є інноваційним рішенням для автоматизованого контролю стану бокових рам візків залізничних вагонів. Цей модуль інтегрований у загальну систему моніторингу та призначений для постійного контролю стану рам, своєчасного виявлення дефектів та оперативного реагування на будь-які відхилення.

Інтеграція системи з платформами аналізу даних дозволяє ефективно відслідковувати стан вагонів та оперативно інформувати операторів про необхідність втручання. Модуль забезпечує оптимізацію процесів контролю, використовуючи спеціалізоване програмне забезпечення без необхідності встановлення додаткових програм. Крім того, віддалений доступ через мережу Інтернет дозволяє оперативно керувати процесом моніторингу, що значно підвищує ефективність та безпеку експлуатації залізничного транспорту.

Розглянемо основних конкурентів, які представлені на ринку систем моніторингу залізничних вагонів:

1. RailSafe Technologies
2. TrainMonitor Pro
3. SecureRail Systems

Для більш детального аналізу техніко-економічних властивостей та переваг конкурентів було проведено порівняльний аналіз показників, який наведено в таблиці 4.4 нижче. В таблиці W позначають гірші значення, N — аналогічні або нейтральні значення, а S — кращі показники.

На основі аналізу конкурентів, проведеного у таблиці 4.4, можна виділити сильні, слабкі та нейтральні характеристики системи моніторингу "Magnetic

Frame Monitor" у порівнянні з основними конкурентами (RailSafe Technologies, TrainMonitor Pro, SecureRail Systems). Було зроблено наступні висновки:

1. **Швидкий зворотний зв'язок:** Усі компанії надають швидкий зворотний зв'язок, що відповідає стандартним вимогам рівня сервісу та підтримки.
2. **Інтеграція з іншими системами безпеки:** "Magnetic Frame Monitor" виділяється завдяки можливості інтеграції з іншими системами моніторингу та аналізу даних, що надає їй конкурентну перевагу.
3. **Здатність до апгрейду:** "Magnetic Frame Monitor" разом з конкурентом SecureRail Systems мають можливість апгрейду, що дозволяє розширювати функціональність системи з часом.
4. **Віддалений моніторинг:** "Magnetic Frame Monitor" пропонує вебпортал для моніторингу, що робить систему зручною для операторів. Ця функція підвищує конкурентоспроможність, оскільки не всі конкуренти мають таку можливість.
5. **Легкість у використанні:** "Magnetic Frame Monitor" пропонує простий і інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що полегшує процес використання і робить систему зручною для кінцевого користувача.
6. **Легкість монтажу:** "Magnetic Frame Monitor" пропонує магнітне кріплення, що забезпечує простоту встановлення та демонтажу, що є додатковою перевагою у порівнянні з конкурентами.
7. **Наявність персонального кабінету:** "Magnetic Frame Monitor" має персональний кабінет для віддаленого управління, що робить контроль стану вагонів більш зручним та ефективним.
8. **Ціна обслуговування та компонентів:** "Magnetic Frame Monitor" пропонує доступне обслуговування, що знижує загальні витрати і надає

перевагу перед конкурентами завдяки нижчій вартості компонентів та сервісу.

Таблиця 4.4 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту "Magnetic Frame Monitor"

№ п/п	Характеристика	Мій Проєкт	Конкурент 1 RailSafe Technologies	Конкурент 2 TrainMonitor Pro	Конкурент 3 SecureRail Systems	W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
1	Швидкий зворотний зв'язок	Наявний	Наявний	Наявний	Наявний	-	+	-
2	Інтеграція з системами аналізу даних	Наявна	Відсутня	Відсутня	Відсутня	-	-	+
3	Здатність до апгрейду	Наявна	Відсутня	Відсутня	Наявна	-	+	-
4	Вебсайт з моніторингом	Наявний	Відсутній	Відсутній	Відсутній	-	-	+
5	Легкість у використанні	Наявна	Наявна	Відсутня	відсутня	-	-	+
6	Легкий монтаж	Наявний	Відсутній	Відсутній	відсутній	-	-	+
7	Наявність персонального кабінету	Наявна	Відсутня	Відсутня	наявна	-	+	-
8	Ціна обслуговування і модуль	Низька	Висока	Висока	висока	-	-	+

Із врахуванням вищезазначених факторів, можна стверджувати, що "Magnetic Frame Monitor" є конкурентоспроможним проєктом на ринку автоматизованих систем моніторингу залізничних вагонів.

Для того, щоб оцінити можливість реалізації проєкту, проведемо технологічний аудит сформованої ідеї (табл. 4.5).

Таблиця 4.5

№ п/п	Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
-------	--------------	--------------------------	----------------------	------------------------

1	Автоматизований модуль моніторингу стану бокових рам	Використання мікроконтролера STM32F103 для програмування модуля	Наявні	У відкритому доступі
2	Система вимірювання та аналізу даних безпеки	Інтеграція з магнітними сенсорами та використання платформи STM32 для управління системою моніторингу	Наявні	Доступно
3	Оптимізація обчислень	Використання персонально-розробленого програмного забезпечення на Python для аналізу даних	Наявні	У відкритому доступі
4	Віддалений моніторинг та керування системою	Використання мережі Інтернет для віддаленого з'єднання та керування	Наявні	Доступно
5	Інтеграція з існуючими системами	Сумісність з системами вимірювання та аналізу даних	Наявні	Доступно
6	Зручне розташування модуля	Інтеграція модуля у систему "Magnetic Frame Monitor"	Наявні	Доступно

Виходячи з наведеної вище таблиці можна зробити висновок, що реалізація проєкту "Magnetic Frame Monitor" є технологічно здійсненою. Всі необхідні технології, використані для створення автоматизованої системи моніторингу стану бокових рам, є доступними для використання. Мікроконтролер STM32F103, як основний елемент проєкту, доступний для закупівлі за доступними цінами, а програмне забезпечення, написане на Python, є відкритим для користувачів, що забезпечує доступність для широкого кола розробників.

#### 4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

Визначимо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проєкту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити його реалізації.

Це дозволяє оцінити, наскільки продукція відповідає потребам ринку, і які фактори слід враховувати для успішного запуску. Для цього спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 4.6).

Таблиця 4.6. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	5
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	10 000 000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стабільний ріст

4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Високий рівень конкуренції, потреба у значних інвестиціях
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відповідність стандартам безпеки
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	15 %

На основі таблиці 4.6 можна стверджувати, що ринок стартап-проєкту "Magnetic Frame Monitor" має помірний ріст і загальний обсяг продажів на рівні 7 500 000 грн на рік. Основні бар'єри для входу на ринок включають високий рівень конкуренції та значні інвестиції, необхідні для забезпечення відповідності стандартам безпеки. Проте, середня норма рентабельності у 15% свідчить про перспективність ринку для подальшого розвитку та прибутковості проєкту.

Надалі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 4.7).

Таблиця 4.7. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту "Magnetic Frame Monitor"

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Підвищення безпеки руху поїздів	Залізничні оператори, транспортні компанії	Великим операторам необхідні надійні та масштабовані рішення, малим — гнучкість та швидкість впровадження	Надійність, інтеграція з існуючими системами, зручність у використанні
2	Оптимізація технічного обслуговування вагонів	Компанії, що займаються обслуговуванням вагонів	Суттєво відрізняється потреба у рівні автоматизації: великі компанії прагнуть зменшити витрати на обслуговування, малі компанії більше орієнтовані на швидкість	Автоматизація, економічність, швидкість впровадження
3	Моніторинг стану вагонів для забезпечення безпеки	Логістичні фірми, ремонтні депо	Логістичні фірми потребують віддалений контроль, ремонтні депо орієнтовані на детальний аналіз стану вагонів	Віддалений моніторинг, детальні звіти, зменшення часу простою

Враховуючи наведені потреби та вимоги потенційних клієнтів, можна стверджувати, що стартап-проєкт "Magnetic Frame Monitor" відповідає



сучасним потребам залізничної галузі. Основними сегментами ринку є транспортні та логістичні компанії, а також державні оператори інфраструктури, що потребують автоматизованих рішень для зменшення витрат та підвищення рівня безпеки. Спроектowana система дозволить ефективно контролювати стан бокових рам візків, мінімізуючи ризики та витрати на обслуговування. Це створює значний потенціал для впровадження даної технології на ринку України та можливого подальшого експорту.

При застосуванні магнітної системи контролю бокових рам візків залізничних вагонів існує ряд потенційних ризиків. Важливо визначити можливі загрози, щоб належним чином підготуватися до їх мінімізації та ефективного управління. Нижче наведено основні фактори загроз та можливі заходи реагування для їх подолання.

Таблиця 4.8. Фактори загроз:

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Технічна складність інтеграції	Можливі труднощі інтеграції системи з існуючою інфраструктурою залізниці	Проведення тестування на всіх етапах, підтримка технічної допомоги при впровадженні системи.
2	Високі витрати на впровадження	Можливі високі початкові витрати на встановлення системи та налаштування обладнання	Оптимізація процесів встановлення, підбір найбільш економічних компонентів для зменшення витрат.
3	Низький рівень довіри до нових технологій	Сумніви серед потенційних користувачів щодо ефективності нової системи	Проведення демонстрацій, навчання для підвищення рівня довіри та усвідомлення переваг нової технології.
4	Обмежений бюджет у клієнтів	Недостатні фінансові можливості для придбання та встановлення системи	Пропозиція фінансових рішень, таких як лізинг чи розстрочка платежів для полегшення фінансового навантаження.

5	Вплив магнітних перешкод	Можливий вплив зовнішніх магнітних полів на ефективність роботи системи	Розробка додаткових заходів захисту від зовнішніх впливів, включаючи екранування магнітних сенсорів.
---	--------------------------	---	--

Основні загрози для проєкту " Magnetic Frame Monitor " включають технічні труднощі інтеграції, високі витрати, недовіру до нових технологій, обмежений бюджет потенційних клієнтів та вплив магнітних перешкод. Для зменшення ризиків необхідно забезпечити підтримку на всіх етапах впровадження, а також адаптувати фінансові рішення, щоб задовольнити потреби клієнтів.

Але поряд із колом загроз існують і певні можливості (таблиця 4.9).

Таблиця 4.9. Фактори можливостей:

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Підвищення ефективності	Використання сучасних магнітних сенсорів підвищує точність контролю бокових рам	Залучення новітніх компонентів для максимізації продуктивності системи
2	Доступність технології	Розвиток ринку інновацій дозволяє розширити доступність технологій для залізниці	Активне співробітництво з потенційними інвесторами для підтримки виробництва
3	Спрощення виробництва	Спрощена конструкція системи дозволяє зменшити витрати на її виробництво	Оптимізація процесів виробництва для зниження вартості та підвищення продуктивності
4	Масштабування на міжнародний ринок	Збільшення інтересу до безпеки залізниць на міжнародному рівні дає можливість масштабування	Розробка стратегії виходу на міжнародні ринки через партнерства
5	Збільшення ринку споживачів	Наявність багатьох залізничних компаній, що зацікавлені у підвищенні безпеки	Просування продукту через виставки, конференції та інші заходи для залучення нових клієнтів

Фактори можливостей для " Magnetic Frame Monitor " включають підвищення ефективності, доступність технології, спрощення виробництва, масштабування на міжнародний ринок та збільшення ринку споживачів. Важливо скористатися цими можливостями для забезпечення стабільного зростання та успішного виходу на ринок.

Відповідно до проведеного аналізу конкуренції на ринку систем контролю бокових рам залізничних вагонів, було виявлено деякі бар'єри для виходу на український та міжнародний ринки. Зокрема, структура ринку демонструє ознаки олігополії, що свідчить про домінування обмеженої кількості компаній, які займаються наданням подібних рішень для залізничних вагонів. Це створює певні виклики для нових гравців ринку, зокрема, таких як стартап-проект "Magnetic Frame Monitor".

Таблиця 4.10. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку:

№	Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1	Тип конкуренції: олігополія	Невелика кількість конкурентів, які займаються подібними технологіями на ринку	Розробка інноваційних функцій, які зроблять продукт відмінним від конкурентів
2	Рівень конкуренції: міжнародний	Конкуренція між великими міжнародними компаніями, що працюють на ринку безпеки залізниць	Підвищення якості продукту та активна участь у міжнародних конференціях для залучення інтересу
3	Конкуренція за технологією	Змагання за впровадження новітніх технологій у системи контролю залізничних вагонів	Інвестування у науково-дослідницькі проекти для вдосконалення та впровадження новітніх технологій
4	Прямі конкуренти	Присутність декількох компаній, що працюють в аналогічному напрямку	Активна робота над ціноутворенням та надання додаткових послуг для підвищення привабливості продукту для клієнтів

Ступеневий аналіз конкуренції показує, що ринок "Магнітної системи контролю бокових рам візків" є конкурентним, і для забезпечення успішного розвитку необхідно звернути увагу на впровадження новітніх технологій, підтримання високої якості продукту та активну роботу з клієнтами.

Після проведення аналізу конкуренції на ринку магнітних систем контролю бокових рам візків залізничних вагонів, ми виконали більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі за Портером. Отриманий аналіз показано у таблиці 4.11.

Таблиця 4.11. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	RailMon Systems, TrackGuard	WagonSecure, FrameCheck	Виробники магнітних сенсорів та мікроконтролерів, Постачальники електронних компонентів для залізничного обладнання	Залізничні компанії, Виробники вагонів, Підприємства з обслуговування залізничного транспорту	Системи для візуального моніторингу стану вагонів, Датчики для вимірювання механічних навантажень на конструкцію
Висновки	Низька інтенсивність конкуренції через відсутність аналогічних продуктів на ринку.	Існують можливості для виходу нових конкурентів, що можуть запропонувати подібні рішення.	Постачальники компонентів не створюють значних бар'єрів, але можлива залежність від якості компонентів.	Клієнти включають залізничні компанії та виробників вагонів, які можуть впливати на умови контрактів.	Товари-замінники мають певні схожі функції, але не повністю відповідають вимогам для моніторингу бокових рам.

Ринок систем контролю стану бокових рам вагонів має значний потенціал, адже зараз відсутні конкуренти, що спеціалізуються на цьому сегменті. Це створює можливість для виходу на ринок, оскільки аналогічних рішень у конкурентів немає, а конкуренція є низькою. Продукти, що існують, не орієнтовані на контроль стану бокових рам, що робить нашу систему затребуваною.

Водночас, залежність від постачальників може вплинути на умови контрактів. Ми працюємо з виробниками електронних компонентів, що створює певну залежність. Основна клієнтська база – залізничні компанії та ремонтні депо – потребує індивідуального підходу до укладення контрактів, щоб врахувати специфічні вимоги кожного клієнта.

Датчики для моніторингу інших технічних параметрів можуть бути використані як товари-замінники, але вони не адаптовані для моніторингу стану бокових рам. Це дає нашій розробці унікальність і конкурентну перевагу на ринку.

Після проведених аналізів визначається та обґрунтовується перелік факторів, які впливають на конкурентоспроможність стартапу "Magnetic Frame Monitor". Ці фактори допоможуть чітко оцінити переваги проекту та визначити основні сильні сторони, що забезпечують його успіх на ринку залізничних технологій.

Таблиця 4.12. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Точність і надійність вимірювань	Висока точність і надійність датчиків із ключовими компонентами забезпечують своєчасне виявлення дефектів бокових рам вагонів, мінімізуючи ризики для безпеки руху.
2	Масштабованість системи	Система може легко адаптуватися під різні масштаби - від невеликих ремонтних депо до великих залізничних підприємств, що робить її універсальною та придатною для різних типів клієнтів.
3	Енергоефективність	Зменшення споживання енергії системою дозволяє знизити експлуатаційні витрати, підвищуючи економічну вигоду для клієнтів.
4	Гнучкість інтеграції з існуючими системами	Легка інтеграція з іншими системами контролю вагонів дозволяє зберігати існуючі інвестиції клієнтів та спрощує процес впровадження нових технологій.
5	Прогнозованість обслуговування	Система надає можливість прогнозувати необхідність технічного обслуговування, що дозволяє запобігати несправностям та оптимізувати витрати на підтримку.

Після аналізу факторів конкурентоспроможності проведемо порівняльний аналіз слабких та сильних сторін (табл. 4.13).

Таблиця 4.13. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Magnetic Frame Monitor»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з METER_Company						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Висока точність вимірювань	18						+	
2	Масштабованість системи	16					+		
3	Енергоефективність	15	+						
4	Інтеграція з існуючими системами залізниці	17		+					
5	Регулярні оновлення програмного забезпечення	14							+

Згідно з проведеним порівняльним аналізом, стартап-проект "Magnetic Frame Monitor" демонструє ряд значних конкурентних переваг. Висока точність вимірювань, масштабованість системи, енергоефективність, інтеграція з існуючими системами залізниці та регулярні оновлення програмного забезпечення роблять проект перспективним та привабливим для споживачів. Зазначені фактори позитивно впливають на конкурентоспроможність продукту в галузі систем контролю стану бокових рам вагонів. Завдяки своїм сильним сторонам "Magnetic Frame Monitor" здатен забезпечити стабільний розвиток та утримання конкурентної позиції на ринку, порівняно з іншими аналогічними рішеннями. Водночас, аналіз також виявив деякі слабкі сторони, які необхідно врахувати для покращення продукту та його подальшої оптимізації.

Таблиця 4.14 SWOT-аналіз стартап-проекту "Magnetic Frame Monitor"

<p><b>Сильні сторони:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Висока точність вимірювань;</li> <li>• Масштабованість системи;</li> <li>• Енергоефективність;</li> <li>• Гнучкість інтеграції з існуючими системами;</li> <li>• Регулярні оновлення програмного забезпечення</li> </ul>	<p><b>Слабкі сторони:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Залежність від якості датчиків, які використовуються в системі.</li> <li>• Висока конкуренція на ринку з боку вже існуючих рішень.</li> <li>• Вартість впровадження для клієнтів може бути високою, особливо для малих підприємств.</li> <li>• Необхідність у постійній підтримці та обслуговуванні обладнання.</li> </ul>
<p><b>Можливості:</b></p>	<p><b>Загрози:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Цінова конкуренція з боку конкурентів.</li> </ol>

1. Збільшення продажів за рахунок поліпшення якості контролю.	2. Можливі технічні проблеми із сумісністю з іншими системами безпеки.
2. Вихід на міжнародний ринок завдяки гнучкій інтеграції системи.	3. Ризик зміни законодавства щодо вимог до залізничної безпеки, що може вплинути на попит на продукт.
3. Залучення державних замовлень на обладнання для залізничних вагонів.	4. Високий рівень залежності від постачальників компонентів.
4. Можливість залучення інвестицій у подальший розвиток технології.	5. Поява нових технологій, які можуть перевершити існуючі рішення.
5. Зменшення витрат на енергоспоживання, що робить продукт привабливішим для клієнтів.	

З проведеного аналізу факторів конкурентоспроможності системи "Magnetic Frame Monitor" видно, що проект має значні конкурентні переваги, зокрема в області точності вимірювань, енергоефективності, гнучкості інтеграції та регулярних оновлень програмного забезпечення. Ці фактори роблять систему привабливою для користувачів, особливо у залізничній галузі, де безпека та надійність є критичними.

Таблиця 4.15. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту "Magnetic Frame Monitor"

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегії нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Висока	3-4 місяці
2	Стратегії компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	Середня	4-6 місяців
3	Стратегії виходу з ринку	Низька	2-3 місяці

З зазначених альтернатив обираємо стратегію компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями, що дозволить максимально використати сильні сторони стартапу та адаптуватися до існуючих викликів ринку. Цей підхід забезпечить конкурентоспроможність проекту "Magnetic Frame Monitor" у середовищі залізничного транспорту.

#### 4.3. Розроблення ринкової стратегії проекту

Для ефективної розробки ринкової стратегії необхідно спочатку визначити стратегію охоплення ринку, зокрема, описати основні цільові групи потенційних споживачів. Основною аудиторією в цьому сегменті є підприємства та організації, які використовують системи моніторингу та

контролю. Вибір конкретного сегменту серед них не є критичним, оскільки всі вони мають спільну потребу в надійному захисті та контролі безпеки приміщень.

Таблиця 4.16. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів прийняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Промислові компанії	Зацікавлені у підвищенні безпеки та моніторингу своїх об'єктів	Високий попит серед підприємств, які працюють з залізничними вагонами	Середня, є компанії, що пропонують аналогічні рішення, але вони менш спеціалізовані	Середня, важливо налагодити контакт з великими операторами
2	Ремонтні депо	Зацікавлені у нових технологіях для зниження ризику несправностей	Високий, оскільки точний контроль технічного стану вагонів — ключовий фактор	Низька, небагато компаній пропонують спеціалізовані системи для бокових рам	Висока, при наявності контактів та успішних демонстрацій продукту
3	Залізничні компанії	Готові впроваджувати технологічні рішення для підвищення безпеки та моніторингу	Середній, залежить від поточних бюджетів і готовності інвестувати в безпеку	Середня, є конкуренти з менш точними системами	Середня, необхідно продемонструвати ефективність рішення та наявність підтримки
Які цільові групи обрано: Під час аналізу потенційних груп споживачів було прийнято рішення, що компанія буде працювати з промисловими компаніями, ремонтними депо та залізничними компаніями.					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів ми обрали цільові групи, які мають найвищий потенціал для впровадження проекту "Magnetic Frame Monitor". Промислові компанії, ремонтні депо та залізничні компанії демонструють значну зацікавленість у впровадженні технологічних рішень для підвищення безпеки та моніторингу. Це свідчить про високий потенціал співпраці, що дозволить досягти конкурентоспроможності на ринку та забезпечити стабільний попит на наш продукт.

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформувавши базову стратегію розвитку.



Таблиця 4.17. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Підсилення сильних сторін стартапу за рахунок ринкових можливостей	Стратегія диференціації	Якісний продукт, до якого прихильні споживачі, постійний зворотний зв'язок з клієнтами	Стратегія диференціації за спеціалізацією та інноваціями

На основі аналізу альтернатив розвитку проекту було обрано стратегію диференційованого маркетингу, яка дозволяє підсилити конкурентні переваги "Magnetic Frame Monitor". Основні конкурентоспроможні позиції включають високу точність вимірювань, енергоефективність та підтримку користувачів, що дає змогу проекту виділитися на ринку. Базова стратегія розвитку передбачає спеціалізацію та впровадження інновацій, що сприятиме підвищенню конкурентоспроможності продукту і забезпеченню стабільного зростання на ринку.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.18).

Таблиця 4.18. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Ні	Буде і шукати нових споживачів, і частково забирати існуючих у конкурентів	Не буде, основою проекту є розробка альтернативних та інноваційних рішень	Стратегія зайняття конкурентної ніші

Проект "Magnetic Frame Monitor" не є першопрохідцем на ринку, але буде активно шукати нових споживачів і частково забирати їх у конкурентів. Основний акцент робиться на розробці альтернативних та інноваційних рішень, що дозволить уникати прямого копіювання конкурентів. Стратегія конкурентної поведінки передбачає зайняття конкурентної ніші, що сприятиме виділенню на ринку та досягненню стійкої позиції.

На основі вимог споживачів з обраного сегменту до постачальника і продукту, а також в залежності від стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляємо стратегію позиціонування яка визначається у формування ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект

Таблиця 4.19. Визначення стратегії позиціонування проекту "Magnetic Frame Monitor":

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувану комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Надійність і точний моніторинг стану бокових рам вагонів	Стратегія лідерства за якістю	Висока точність вимірювань, інтеграція з існуючими системами залізниці, енергоефективність	Точність, Надійність, Інновації

Результатом даного підрозділу є система рішень щодо ринкової поведінки компанії, вона визначає в якому напрямі буде працювати компанія на ринку.

#### 4.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 4.20 підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.20. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Надійний моніторинг бокових рам вагонів	Висока точність та постійний контроль	Автоматизація процесу моніторингу, зменшення впливу людського фактора
2	Зниження ризику несправностей та аварій	Швидке виявлення проблем і своєчасна реакція	Система безперервного моніторингу, що забезпечує швидке виявлення та усунення проблем
3	Зменшення витрат на технічне обслуговування	Оптимізація процесу діагностики і обслуговування	Зменшення потреби в ручній перевірці, зниження витрат на персонал
4	Підвищення ефективності управління ремонтними роботами	Автоматичне генерування звітів про стан бокових рам	Інтеграція з існуючими системами управління ремонтами для підвищення ефективності

Проект "Magnetic Frame Monitor" пропонує автоматизоване рішення для моніторингу бокових рам вагонів, яке забезпечує високу точність, швидке

виявлення проблем та зниження витрат на обслуговування. Завдяки зменшенню впливу людського фактора та інтеграції з існуючими системами управління, продукт стає конкурентоспроможним і привабливим для потенційних клієнтів у залізничній галузі.

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Система автоматизованого моніторингу бокових рам		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики:	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Довговічність (немає строку давності)	1. М	1. Е
	2. Висока точність вимірювань	2. Нм	2. Тх
	3. Легкість встановлення та демонтажу	3. М	3. Тл
	4. Автоматизація процесів діагностики	4. Нм	4. Ор
	5. Віддалений моніторинг стану	5. Нм	5. Вр
	Якість: відповідає нормам ДСТУ2499:2017		
	Пакування: Модуль системи моніторингу з документацією, Коробка, Акумулятор, програмне забезпечення для ПК		
	Марка: Magnetic Frame Monitor		
III. Товар із підкріпленням	До продажу ; консультації, демонстрації, гарантія.		
	Після продажу; : технічна підтримка, планове обслуговування, оновлення програмного забезпечення, інструктаж персоналу користувачів щодо роботи системи.		

З наведеного аналізу видно, що на першому рівні представлено основну концепцію проекту — автоматизовану систему моніторингу бокових рам залізничних вагонів "Magnetic Frame Monitor". На другому рівні розкриваються важливі характеристики та переваги продукту, такі як довговічність, висока точність вимірювань, легкість встановлення, автоматизація процесів діагностики та віддалений моніторинг стану. Всі ці характеристики роблять продукт перспективним і конкурентоспроможним на ринку систем моніторингу залізничних вагонів.

Після детального аналізу властивостей та характеристик продукту необхідно визначити цінові межі для встановлення вартості товару. Ці межі формуються на основі цін конкурентів та доходів цільових споживачів.

Таблиця 4.22. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	Від 7000 до 45000 грн	Немає аналогів на ринку	Від 20000 грн і вище	Від 15000 до 70000 грн

Отримані межі встановлення ціни на "Magnetic Frame Monitor" враховують аналіз ринку товарів-замінників, відсутність аналогів на ринку та доходи цільової аудиторії. Рекомендовані межі встановлення ціни становлять від 15000 до 70000 гривень, що дозволяє враховувати особливості ринку та забезпечити доступність для цільової аудиторії, при цьому зберігаючи конкурентоспроможність.

Таблиця 4.23. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Промислові компанії, ремонтні депо, залізничні компанії	Технічна підтримка, налаштування, навчання користувачів, регулярне обслуговування	Ринок України\Світу	Прямі продажі через веб-сайт, спеціалізовані демонстрації продукту

Отже, отримана система збуту "Magnetic Frame Monitor" враховує специфіку ринку залізничного транспорту та потреби цільових клієнтів у надійній підтримці та обслуговуванні. Продажі плануються через веб-сайт та прямі поставки з акцентом на демонстрацію продукту, що дозволить клієнтам отримати повну технічну підтримку та впевненість у якості системи. Це забезпечить конкурентну перевагу на ринку України та сприятиме залученню нових клієнтів.

На основі вимог споживачів з обраного сегменту до постачальника і продукту, а також в залежності від стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки, розробляємо стратегію позиціонування, яка визначається у

формуванні ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект.

Таблиця 4.24. Концепція маркетингових комунікацій для проекту "Magnetic Frame Monitor":

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Пошук системи автоматизованого моніторингу бокових рам, яка відповідає вимогам надійності та безпеки.	Спеціалізовані веб-сайти, виставки, конференції.	Висока точність вимірювань, автоматизація процесів, зручний інтерфейс користувача для віддаленого моніторингу.	Підкреслити переваги автоматизованого моніторингу та зниження ризику несправностей.	Акцент на безпеку, надійність, та ефективність системи моніторингу бокових рам.

В результаті формування концепції маркетингових комунікацій було визначено, що основною поведінкою цільових клієнтів є пошук надійної системи моніторингу, яка відповідає їх вимогам до безпеки та точності. Основними каналами комунікацій будуть спеціалізовані веб-сайти, виставки та конференції. Рекламне повідомлення буде спрямоване на підкреслення автоматизації процесів діагностики, мінімізацію людського фактору, та надійний контроль стану бокових рам вагонів.

#### **4.5. Організація реалізації стартап-проекту "Magnetic Frame Monitor"**

Для успішної реалізації проекту "Magnetic Frame Monitor" важливо створити команду, яка забезпечить ефективне виконання завдань. Ключовими учасниками команди є інженери, програмісти, маркетологи та менеджери, які виконуватимуть конкретні функції. Згідно з розподілом завдань у таблиці 4.23, кожен учасник відповідає за свою частину проекту, що дозволить зосередитись на основних етапах розвитку продукту, таких як вдосконалення системи моніторингу, автоматизація процесів діагностики та інтеграція з існуючою інфраструктурою.

Таблиця 4.25. Команда стартап-проєкту "Magnetic Frame Monitor"

Учасник команди	Посада	Завдання, що необхідно виконати
Інженер-розробник	Керівник розробки	Розробити прототип системи моніторингу бокових рам вагонів, забезпечити його функціональність.
Архітектор програмного забезпечення	Головний програміст	Розробити програмне забезпечення для системи автоматизованого моніторингу стану бокових рам.
Менеджер проєкту	Керівник проєкту	Координувати роботу команди, визначити критичні точки та організувати виконання задач.
Спеціаліст з інтеграції систем	Інженер інтеграції	Забезпечити сумісність системи моніторингу з існуючими залізничними платформами.
Експерт з маркетингу	Спеціаліст аналізу ринку	Провести маркетинговий аналіз, розробити стратегію просування продукту на ринку залізничних рішень.

З метою забезпечення своєчасного виконання завдань створено детальний графік, який чітко визначає терміни та відповідальних осіб за кожен частину робіт. Створений графік подано у таблиці 4.26 нижче.

№ п/п	Зміст етапу	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Собівартість реалізації
1	Розробка прототипу системи моніторингу	■	■											4500\$
2	Розробка програмного забезпечення			■	■	■								3000\$
3	Тестування та налаштування функціональності системи					■	■							2000\$
4	Проведення аналізу ринку та розробка стратегії маркетингу				■	■								1500\$
5	Підготовка та запуск рекламної кампанії							■	■	■				2000\$
6	Випуск на ринок та подальша підтримка клієнтів								■	■	■	■	■	6000\$
	Сума													19000\$

На підставі розробленого календарного плану, вартість повного процесу від формування проєкту до початку продажу «Magnetic Frame Monitor» оцінюється приблизно в 650 тис. грн. Сам процес реалізації проєкту включає кілька етапів, серед яких: розробка надійного модуля моніторингу стану

бокових рам вагонів, створення конструкції та супутньої технічної документації, розробка програмного забезпечення, пошук інвестицій, запуск виробництва та організація продажу.

Таким чином, виробництво та впровадження «Magnetic Frame Monitor» передбачає кілька етапів, які включають розробку модуля для моніторингу стану бокових рам вагонів, розробку програмного забезпечення, пошук інвестицій та запуск виробництва, що забезпечить успішну реалізацію проєкту.

Після створення календарного плану необхідно розробити таблицю вихідних витрат на компоненти та обладнання, необхідні для виготовлення модуля. Розрахунки за цією ініціативою наведено в Таблиці 4.27.

Таблиця 4.27. - Витрати на виробництво

№ п/п	Витрати	Тип	Терміни постачання/виконання	Вартість, \$
1	Мікроконтролер STM32	----	3 дні	10
2	Модуль для Bluetooth	----	3 дні	8
3	Датчик ММС5603NJ	----	5 днів	20
4	Макетна плата	----	4 дні	5
5	Паяльна станція	----	2 дні	60
6	Припій	----	3 дні	5
7	Флюс	----	5 днів	4
8	Розхідні матеріали	----	5 днів	50
9	Акумулятор	----	4 дні	15
10	Корпус для модуля	----	5 днів	13
	<b>Сума</b>			<b>190</b>

На підставі розробленого календарного плану, вартість повного процесу від формування проєкту до початку виробництва модуля "Magnetic Frame Monitor" оцінюється приблизно в 190 доларів. Для старту виробництва необхідно мати початкові кошти в розмірі 20 000 доларів, що включає закупівлю компонентів, розробку прототипу, тестування та маркетингові заходи. Подальше фінансування планується отримати через залучення інвесторів на платформі Kickstarter, що забезпечить розширення виробництва та успішну реалізацію продукту на ринку.

## Висновок до 4 розділу

У цьому розділі розглянуто перспективи впровадження системи автоматизованого моніторингу стану бокових рам залізничних вагонів — "Magnetic Frame Monitor". Проєкт є надзвичайно важливим для підвищення безпеки залізничних перевезень, адже він забезпечує своєчасне виявлення дефектів та контроль технічного стану бокових рам, що значно знижує ймовірність аварійних ситуацій та покращує ефективність технічного обслуговування. Запропонована система використовує новітні технології магнітних сенсорів, що забезпечують високу точність вимірювань та здатність до постійного моніторингу стану вагонів у реальному часі. Завдяки цьому, оператори та технічний персонал зможуть вчасно виявляти проблеми та здійснювати необхідне обслуговування без значних затримок, що дозволить уникнути простоїв і знизити витрати на ремонт.

Розроблений календарний план реалізації проєкту показує, що загальна вартість етапів, пов'язаних із його втіленням, оцінюється на рівні приблизно 20 000 доларів США. Процес включає кілька ключових етапів: розробку магнітних сенсорів і модулів для моніторингу, створення програмного забезпечення для аналізу даних, тестування, а також пошук інвестицій і запуск виробництва. Особливу увагу приділено залученню інвесторів за допомогою краудфандингових платформ, таких як Kickstarter, та участі у спеціалізованих виставках, що дозволить ефективно профінансувати проєкт і забезпечити його подальшу реалізацію. Крім того, створення потужної маркетингової стратегії для просування продукту допоможе вийти на ринок та залучити широке коло потенційних клієнтів, зокрема великих залізничних операторів і ремонтних депо.

Таким чином, впровадження системи "Magnetic Frame Monitor" є перспективним кроком для підвищення безпеки залізничного транспорту, забезпечуючи інноваційний підхід до автоматизації процесів діагностики та мінімізації людського впливу. Реалізація цього проєкту сприятиме



підвищенню рівня безпеки та розвитку нових можливостей у сфері технічного обслуговування залізничних вагонів. У перспективі це також дозволить знизити витрати на ремонт і технічне обслуговування, покращити логістичні процеси та підвищити загальну ефективність функціонування залізничного транспорту. Завдяки використанню сучасних технологій та інноваційних рішень, система "Magnetic Frame Monitor" має потенціал стати стандартом у галузі моніторингу технічного стану залізничних вагонів, забезпечуючи надійність і безпеку перевезень на новому рівні.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1]Магнітний неруйнівний контроль: Навчальний посібник / Ю.В. Куц, А.Г. Протасов, В.К. Цапенко, В.С. Єременко, Ю.Ю. Лисенко, К: НТУУ "КПІ". – 2012. – 139 с.
- [2]Технології електромагнітного неруйнівного контролю. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 63 с
- [3]Charles J. Hellier Handbook of nondestructive evaluation. NY.: McGRAW-HILL, 2003. – 594p.
- [4]Електричний, магнітний та електромагнітний види контролю: навчальний посібник / О. Є. Середюк, О. Б. Барна, О. С. Криницький – ІваноФранківськ: ІФНТУНГ, 2017. – 330 с.
- [5]Мікроконтролер STM32F103X6 [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheetpdf/view/201590/STMICROELECTRONICS/STM32F103C8.html>
- [6]General magnetic field sensors. Data sheet. – Philips, 1998. – 58 pages.
- [7]W. Sharatchandra Singh, B. P. C. Rao, S. Thirunavukkarasu, and T. Jayakumar "Flexible GMR Sensor Array for Magnetic Flux Leakage Testing of Steel Track Ropes". – Hindawi Publishing Corporation, Journal of Sensors, Article ID 129074, 2012. – 6 p.

- [8]F. Vacher, C. Gilles-Pascaud, J.M. Decitre, C. Fermon, M. Pannetier “Nondestructive testing with GMR Magnetic Sensor Arrays”. – ECNDT, 2006. – 8p.
- [9]C. H. Smith, R. W. Schneider, T. Dogaru, and S. T. Smith “GMR magnetic sensor arrays for eddy-current nondestructive testing”. – AIP Conference Proceedings, 2003. – 8 p.
- [10]Benoît Marchand, Jean-Marc Decitre, Olivier Casula “Recent Developments of Multi-Elements Eddy Current Probes”. – 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China. – 8p.
- [11]Hall effect sensing and application. Data sheet. – Illinois: Honeywell. – 126p.
- [12]C. Gilles-Pascaud, J.M.Decitre, F.Vacher, C.Fermon, M.Pannetier, G.Cattiaux “Eddy current flexible probes for complex geometries”. – QNDE2005 Workshop Proceedings, Vol. 25A, 2005. – 399 p.
- [13]Dr. Carl H. Smith, Robert W. Schneider “Chip-size magnetic sensor arrays”. – NVE Corporation, prepared for Sensors EXPO, 2002. – 8p.
- [14]Jean-François Bureau, Robert C. Ward, Wade Jenstead “Advances In Eddy Current Array Sensor Technology”. – 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, 2008. – 4p.
- [15]Gerhard Mook, Fritz Michel, Jouri Simonin “Electromagnetic imaging using probe arrays”. – The 10th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing “Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering”, Ljubljana, Slovenia, 2009. – 18p.
- [16]Eduardo Ramirez-Pacheco, José H. Espina-Hernandez, Francisco Caleyó, José M. Hallen “Estimation of the defects dimension with a GMR eddy current sensor”. – 5<sup>th</sup> Pan American Conference for NDT, Cancun, Mexico, 2011. – 10p.
- [17]L.Perez, C.Dolabdjian, W.Waché, L.Butin “Advanced in magneto resistance magnetometer performances applied in eddy currents sensor arrays”. – 16<sup>th</sup> World Conference on NDT, Montreal, Canada, 2004. – 4p.

- [18]MAG3110 Data sheet: Technical Data. – Freescale Semiconductor, Inc., 2013. – 30 pages.
- [19]Мікропроцесорна техніка: лабораторний практикум. Частина 2. [Електронний ресурс] / А. С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 76 с.
- [20]Мікропроцесорна техніка: лабораторний практикум. Частина 1. [Електронний ресурс] / А. С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 113 с. 18. С. Н. Smith, R. W. Schneider, T. Dogaru, and S. T. Smith “GMR magnetic sensor arrays for eddy-current nondestructive testing”. – AIP Conference Proceedings, 2003. – 8 p.
- [21]Benoît Marchand, Jean-Marc Decitre, Olivier Casula “Recent Developments of Multi-Elements Eddy Current Probes”. – 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China. – 8p.
- [22]Marc Kreutzbruck, Andreas Neubauer, Matthias Pelkner, Verena Reimund “Adapted GMR Array used in Magnetic Flux Leakage Inspection”. – 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16-20 April 2012, Durban, South Africa. – 8p.
- [23] Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.
- [24]Куц Ю.В. Новітні системи та технології: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с.
- [25]Дослідження вихрострумівих перетворювачів для контролю зварних швів конструкцій із алюмінієвих сплавів з використанням дефектоскопа на базі смартфона / Мок Г., Учанін В.М., Лисенко Ю.Ю. // Технічна діагностика і неруйнівний контроль, 2024, №3, стор. 32-38.
- [26]Ефективність технології автоматизованої вихрострумової дефектокопії з матричними перетворювачами / Лисенко Ю.Ю., Куц Ю.В., Мірчев Й.,

- Левченко О.Е., Глабець С.М. // Технічна діагностика і неруйнівний контроль, 2024, №3, стор. 3-8.
- [27]Enhancing neural network efficiency in automated image analysis for thermal nondestructive testing / D. Storozhyk, A Protasov, Y. Kuts, O. Muraviov, I. Lysenko, Y. Mirchev // Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Sofia, Vol.54 (2024) pp. 242-252
- [28]Evaluation Of Eddy Current Array Performance In Detecting Aircraft Component Defects / I. Lysenko, Y. Kuts, V. Uchanin, Y. Mirchev, O. Levchenko // Transactions on Aerospace Research, Institute of Aviation: Poland, 2024. –Volume 2/2024 (275). – pp. 1-9
- [29]Eddy Current Array Testing of Steel Tube Profiles / Mirchev Y., I. Lysenko I., V. Kovtun, Ts. Borisov, P. Chukachev // International Journal “NDT Days”, BSNDT: Bulgaria, 2023. – Volume 6, Issue 3. – 137-147 pp.
- [30]Using the RedPitaya platform in automated eddy current testing / Levchenko O., Aleksiev A., Kuts Y., Lysenko I. // International Journal “NDT Days”, BSNDT: Bulgaria, 2023. – Volume 6, Issue 4. – 194-201 pp.
- [31]Advantages of Using Eddy Current Array for Detection and Evaluation of Defects in Aviation Components / Lysenko I., Mirchev Y., Levchenko O., Kuts Y., Uchanin V. // International Journal “NDT Days”, BSNDT: Bulgaria, 2023. – Volume 6, Issue 2. – 84-88 pp.
- [32]Automated Eddy Current System for Aircraft Structure Inspection / Iuliia Lysenko, Yurii Kuts, Valentyn Petryk, Volodymyr Malko, Andrii Melnyk // Transactions on Aerospace Research, Institute of Aviation: Poland, 2023. – Volume 4/2023 (273). – 33-40 pp.
- [33]Analysis of formation processes of informative features in eddy current probes with pulsed excitation mode / I. Lysenko, Y. Kuts, V. Uchanin, A. Protasov // Research and Review Journal of Nondestructive Testing, vol. 1, no. 1"