

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів

**ЗАСТОСУВАННЯ ВОЛОКНО-ОПТИЧНИХ СЕНСОРІВ І НЕЙРОМЕРЕЖ ДЛЯ
КОНТРОЛЮ ВІЛЬНОСТІ КОЛІ ТА ЦІЛОСНОСТІ РЕЙОК НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ
ТРАНСПОРТІ**

Пояснювальна записка

**ДО ВИПУСКНОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ПЕРШОГО ОСВІТНЬОГО
СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА**

ВКР.01.25.01.20.ПЗ

Розробив слухач групи 106-АКІТ-д21



Максим Канєвський

Перевішив доц., к.т.н.



Віктор Кустов

Рецензент доц., к.т.н.



Андрій Єлізаренко

Харків 2025

Annotation

This qualification paper explores the application of fiber-optic sensors (FOS) and neural networks to enhance railway transport safety and efficiency through track occupancy and rail integrity monitoring. A critical analysis of existing monitoring methods is performed, highlighting their limitations, and the advantages of FOS, such as immunity to electromagnetic interference, long-distance monitoring capabilities, and cost-effectiveness, are substantiated. The principles of operation for various FOS types (FBG, DAS, DTS, Rayleigh) and their application in detecting deformations, vibrations, and anomalies are detailed.

The novelty of this research lies in the development and substantiation of a fundamentally new approach to utilizing existing Distributed Acoustic Sensors (DAS) for railway track monitoring. Unlike traditional localized sensor applications that only react to direct triggering, this work proposes analyzing vibrations and acoustic signals generated by the train itself to obtain information about the track condition at a significant distance ahead of the rolling stock. This enables proactive detection of rail integrity breaches and foreign objects on the track long before their approach, providing critically important time for response and prevention of potential incidents.

Vibration analysis is conducted to understand the propagation of rolling stock-induced vibrations along the rail and to detect rail integrity breaches or foreign objects based on signal spectrum changes and reflected waves. Significant attention is given to integrating neural networks (CNN, LSTM, Autoencoder) for automated processing and classification of sensor data, enabling effective event recognition and anomaly detection with high accuracy. A hazard classification algorithm is proposed, based on three state levels (normal, warning, critical), ensuring timely responses to potential threats.

Анотація

У кваліфікаційній роботі досліджено застосування волоконно-оптичних сенсорів (ВОС) та нейронних мереж для підвищення безпеки та ефективності залізничного транспорту шляхом контролю вільності колії та цілісності рейок. Проведено критичний аналіз існуючих методів контролю, висвітлено їхні недоліки та обґрунтовано переваги ВОС, такі як несприйнятливність до електромагнітних завад, можливість моніторингу на великих відстанях та економічна ефективність. Детально розглянуто принципи роботи різних типів ВОС (FBG, DAS, DTS) та їхнє застосування для виявлення деформацій, вібрацій та аномалій.

Новизна дослідження полягає у розробці та обґрунтуванні принципово нового підходу до використання вже існуючих DAS для моніторингу залізничної колії. На відміну від традиційного локального застосування сенсорів, що реагують лише на безпосереднє спрацьовування, дана робота пропонує аналізувати вібрації та акустичні сигнали, що генеруються поїздом, для отримання інформації про стан колії на значній відстані попереду рухомого складу. Це дозволяє здійснювати проактивне виявлення порушень цілісності рейки та сторонніх предметів на колії задовго до їхнього наближення, надаючи критично важливий час для реагування та запобігання потенційним інцидентам.

Виконано вібраційний аналіз для розуміння поширення вібрацій по рейці, викликаних рухомим складом, та виявлення порушень цілісності рейки чи сторонніх предметів на основі зміни спектру сигналу та відбитих хвиль. Значна увага приділена інтеграції нейронних мереж (CNN, LSTM, Autoencoder) для автоматичної обробки та класифікації сенсорних даних, що дозволяє ефективно розпізнавати події та виявляти аномалії з високою точністю. Запропоновано алгоритм класифікації небезпеки на основі трьох рівнів стану (нормальний, попередження, критичний), що забезпечує своєчасне реагування на потенційні загрози.

Український державний університет залізничного транспорту
Факультет інформаційно-керуючих систем та технологій

Кафедра автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів
Ступінь освіти бакалавр
Спеціальність 151 «Автоматика та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,
доцент, канд. техн. наук

 **Василь СОТНИК**
«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Канєвському Максиму Володимировичу, групи 106-АКІТ-Д21

1 Тема «Застосування волоконно-оптичних сенсорів і нейромереж для контролю вільності колії та цілісності рейок на залізничному транспорті» затверджена розпорядженням по факультету інформаційно-керуючих систем та технологій від «24» лютого 2025 р. за № 11

2 Строк подання студентом закінченої роботи « 10 » червня 2025 р.

Вихідні дані:

Правила технічної експлуатації залізниць України (ПТЕ).

Інструкція з сигналізації на залізницях України (ІСІ).

Норми технологічного проектування пристроїв автоматики та телемеханіки на залізничному транспорті України.

Наукові та технічні публікації щодо волоконно-оптичних сенсорів (DAS, FBG, Rayleigh Scattering).

Матеріали з розробки та впровадження систем розподіленого акустичного моніторингу на транспорті (Distributed Acoustic Sensing).

Методичні матеріали та наукові статті з аналізу даних за допомогою нейромереж (CNN, LSTM, Autoencoder).

3 Зміст розрахунково-пояснювальної записки

Вступна частина:

- титульний аркуш;
- завдання на випускну роботу (з додатком);
- реферат;
- зміст.

Основна частина:

- вступ;
- суть роботи (назви розділів роботи з висновками по кожному розділу);
- висновки по роботі;
- перелік посилань.

Додатки.

4 Перелік графічного матеріалу

1. Класифікація систем контролю вільності колій.
2. Структурна схема системи контролю з використанням волоконно-оптичних сенсорів.
3. Принцип поширення вібрацій по рейці при русі поїзда.
4. Спрощена діаграма DAS-системи (Distributed Acoustic Sensing).
5. Приклад спектру сигналу з волоконно-оптичного сенсора.
6. Алгоритм роботи нейромережі для класифікації подій.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
1 Аналіз існуючих систем контролю вільності та стану колій	20.03.2025 р.	
2 Принцип дії та класифікація волоконно-оптичних сенсорів	20.04.2025 р.	
3 Вібраційний аналіз: стан рейки та виявлення перешкод	20.05.2025 р.	
4 Застосування нейромереж для обробки сигналів	01.06.2025 р.	

Примітка – Розгорнутий календарний план виконання випускної кваліфікаційної роботи наведений у додатку до завдання.

Студент  Максим Канєвський

Керівник  Віктор КУСТОВ

ДОДАТОК ДО ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
Реферат	10.06.2025	
Вступ	01.06.2025	
1 Аналіз існуючих систем контролю вільності та стану колій	30.04.2025	
1.1 Огляд традиційних методів		
1.2 Недоліки класичних систем		
1.3 Можливості волоконно-оптичних сенсорів та їх переваги		
1.4 Висновки по розділу		
2 Принципи дії та класифікація волоконно-оптичних сенсорів	15.05.2025	
2.1 DAS, FBG, Rayleigh — огляд		
2.2 Особливості монтажу та експлуатації в умовах залізниці		
2.3 Структура систем збору та обробки даних		
2.8 Висновки по розділу		
3 Вібраційний аналіз: стан рейки та виявлення перешкод	30.05.2025	
3.1 Природа вібрацій, які генерує рухомий склад		
3.2 Поширення вібрацій по рейці		
3.3 Аналіз порушення цілісності рейки за спектром сигналу		
3.4 Виявлення сторонніх предметів за характером відбитої вібрації		
3.5 Висновки по розділу		
4. Застосування нейромереж для обробки сигналів	05.06.2025	
4.1 Вибір моделей (CNN, LSTM, Autoencoder для аномалій)		
4.2 Порівняння точності розпізнавання подій		
4.3 Алгоритм класифікації небезпеки по сигналу		
4.4 Висновки по розділу		
Висновки	10.06.2025	
Список використаних джерел	10.06.2025	

Студент  Іаксим Канєвський

Керівник  Віктор КУСТОВ

Abstract

This qualification paper investigates the application of fiber-optic sensors and neural networks to enhance railway transport safety and efficiency by monitoring track occupancy and rail integrity. The work consists of four main sections. The first section analyzes initial data and develops a structural diagram of the control and monitoring system. It reviews traditional railway track condition monitoring methods, such as visual inspection, non-destructive testing (ultrasonic, eddy current, magnetic particle, radiographic, and penetrant testing), track-measuring trolleys, track circuits, and axle counter systems, highlighting their drawbacks, including subjectivity, labor-intensiveness, limitations in detecting hidden defects, and susceptibility to environmental factors. The advantages of fiber-optic sensors are emphasized, including their immunity to electromagnetic interference, long-distance monitoring capability, cost-effectiveness, and real-time data acquisition. The second section outlines the technical requirements for the module. The third section focuses on vibration analysis, which is crucial for assessing rail condition and detecting obstacles. It provides a detailed description of the nature of vibrations generated by rolling stock (passenger and freight trains), their propagation along the rail, and attenuation mechanisms. Calculations for the speed of longitudinal and transverse waves in steel are presented, along with attenuation coefficients for freight and passenger trains. The section explains how rail integrity breaches (micro-cracks, complete breaks) affect the signal spectrum and how these changes can be detected using fiber-optic sensors, particularly Distributed Acoustic Sensors (DAS). The detection of foreign objects based on reflected vibration characteristics is also discussed. The fourth section concentrates on the application of neural networks for signal processing. It justifies the selection of Convolutional Neural Networks (CNNs) for pattern recognition, Long Short-Term Memory (LSTM) networks for time series processing, and Autoencoders for anomaly detection. A comparison of event recognition accuracy among these models is presented, and factors influencing their performance are identified. An algorithm for hazard level classification is proposed, encompassing three levels: normal, warning, and critical, enabling prompt responses to potential threats. The paper spans 76 pages, includes 18 figures, 6 tables.

Реферат

У даній кваліфікаційній роботі досліджується застосування волоконно-оптичних сенсорів та нейронних мереж для підвищення безпеки та ефективності залізничного транспорту шляхом контролю вільності колії та цілісності рейок. Робота складається з чотирьох основних розділів. У першому розділі виконано аналіз вихідних даних та розроблено структурну схему системи керування і контролю. Розглянуто традиційні методи контролю стану залізничних колій, такі як візуальний огляд, неруйнівні методи контролю (ультразвуковий, вихрострумний, магнітопорошковий, радіографічний та капілярний контроль), колієвимірювальні візки, рейкові кола та системи лічення вісей, та виявлено їхні недоліки, зокрема суб'єктивність, трудомісткість, обмеження щодо виявлення прихованих дефектів та чутливість до зовнішніх факторів. Висвітлено переваги волоконно-оптичних сенсорів, включаючи їхню стійкість до електромагнітних завад, здатність до моніторингу на великих відстанях, економічну ефективність та можливість збору даних у реальному часі. У другому розділі було створено технічне завдання. Третій розділ присвячений вібраційному аналізу, який є ключовим для оцінки стану рейки та виявлення перешкод. Детально описано природу вібрацій, що генеруються рухомим складом (пасажирськими та вантажними поїздами), їхнє поширення по рейці та механізми загасання. Наведено розрахунки швидкості поздовжніх та поперечних хвиль у сталі та визначено коефіцієнти загасання для вантажних та пасажирських поїздів. Розглянуто, як порушення цілісності рейки (мікротріщини, повні розриви) впливають на спектр сигналу та як ці зміни можуть бути виявлені за допомогою волоконно-оптичних сенсорів, зокрема DAS. Також обговорено виявлення сторонніх предметів за характером відбитої вібрації. Четвертий розділ зосереджений на застосуванні нейронних мереж для обробки сигналів. Обґрунтовано вибір згорткових нейронних мереж (CNN) для розпізнавання образів, мереж Long Short-Term Memory (LSTM) для обробки часових рядів та автокодувальників для виявлення аномалій. Проведено порівняння точності розпізнавання подій цими моделями та визначено фактори, що впливають на їхню ефективність. Запропоновано алгоритм класифікації небезпеки за сигналом, що включає три рівні: нормальний стан, попередження та критичний стан, що дозволяє оперативно реагувати на потенційні загрози. Робота містить 75 сторінок, 18 рисунків, 6 таблиць.

Зміст

Вступ	11
1 Аналіз існуючих систем контролю вільності та стану залізничних колій	12
1.1 Огляд традиційних методів	12
1.2 Недоліки класичних систем	16
1.3 Моливості волоконно-оптичних сенсорів та їх переваги	18
1.4 Висновки по розділу	24
2 Принцип дії та класифікація волоконно-оптичних сенсорів	27
2.1 DAS, FBG, Rayleigh — огляд	27
2.2 Особливості монтажу та експлуатації в умовах залізниці	32
2.3 Структура систем збору та обробки даних	36
2.4 Висновки по розділу	39
3 Вібраційний аналіз: стан рейки та виявлення перешкод	41
3.1 Природа вібрацій, які генерує рухомий склад	41
3.2 Поширення вібрацій по рейці	43
3.3 Аналіз порушення цілісності рейки за спектром сигналу	49
3.4 Виявлення сторонніх предметів за характером відбитої вібрації	56
3.5 Висновки по розділу	59
4 Застосування нейромереж для обробки сигналів	63
4.1 Вибір моделей (CNN, LSTM, Autoencoder для аномалій)	63
4.2 Порівняння точності розпізнавання подій	69
4.3 Алгоритм класифікації небезпеки по сигналу	74
4.4 Висновки по розділу	77
Висновки	79
Використані джерела	81

					ВКР.01.25.01.20.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Канєвський				Розроблення апаратного забезпечення мікропроцесорного модуля взаємодії системи керування з виконавчими пристроями	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перев.	Кустов						10	27
Н. контр	Ананьєва					УкрДУЗТ		
Затв.	Слізаренко							

Вступ

Залізничний транспорт є однією з найважливіших ланок світової транспортної інфраструктури, що забезпечує перевезення значних обсягів вантажів та пасажирів. Ефективність, безпека та надійність залізничних перевезень безпосередньо залежать від стану колії, зокрема цілісності та стабільності рейок. Будь-які дефекти чи пошкодження рейкової колії можуть призвести до аварій, затримок у русі та значних економічних збитків. Традиційні методи контролю стану колії, що часто ґрунтуються на візуальних оглядах та ручному вимірюванні, є часозатратними, вимагають значних людських ресурсів і не завжди дозволяють виявляти приховані дефекти на ранніх стадіях.

У зв'язку з цим, існує нагальна потреба у розробці та впровадженні інноваційних, автоматизованих систем моніторингу, здатних забезпечувати безперервний та високоточний контроль стану залізничної колії. Останні досягнення у галузі волоконно-оптичних сенсорних технологій відкривають нові перспективи для вирішення цієї проблеми. Волоконно-оптичні сенсори, завдяки своїй стійкості до електромагнітних перешкод, можливості роботи на великих відстанях, високій чутливості та здатності інтегруватися в існуючу інфраструктуру, стають перспективним інструментом для моніторингу залізничних шляхів.

Ця робота присвячена дослідженню та аналізу можливостей застосування волоконно-оптичних сенсорів у поєднанні з акустичними сигналами та вібраціями, що генеруються рухомими поїздами, для діагностики стану рейкової колії далеко попереду потяга. Зокрема, буде розглянуто, як за допомогою розподілених волоконно-оптичних систем чутливого типу можна реєструвати акустичні та вібраційні коливання, викликані рухом поїзда, та використовувати ці дані для виявлення аномалій та дефектів у рейках. Актуальність роботи обумовлена зростаючими вимогами до безпеки та ефективності залізничних перевезень, а також потенціалом запропонованого підходу до зниження експлуатаційних витрат та запобігання аварійним ситуаціям.

					ВКР.01.25.01.20.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Висновки

У даній кваліфікаційній роботі було проведено комплексний аналіз та обґрунтовано доцільність застосування волоконно-оптичних сенсорів та нейронних мереж для підвищення безпеки та ефективності функціонування залізничного транспорту шляхом моніторингу вільності колії та цілісності рейок. Дослідження підтвердило, що традиційні методи контролю, попри їхню історичну значущість, мають суттєві недоліки, такі як суб'єктивність, трудомісткість, обмеженість у виявленні прихованих дефектів та вразливість до зовнішніх факторів.

Запропонований підхід, що базується на ВОС, демонструє значні переваги. Зокрема, волоконно-оптичні сенсори є несприйнятливими до електромагнітних завад, що критично важливо в залізничному середовищі з високовольтними лініями електропередачі та електричним обладнанням. Вони забезпечують моніторинг на великих відстанях (до 100 км для DAS) з одного сенсорного блоку, зменшуючи потребу у великій кількості дискретних датчиків та пов'язаної з ними інфраструктури, що сприяє зниженню витрат на встановлення та обслуговування. Крім того, ВОС дозволяють збирати дані в реальному часі, що є фундаментальною перевагою для оперативного виявлення потенційних проблем та вжиття проактивних заходів.

Детальний вібраційний аналіз, представлений у роботі, дозволив зрозуміти природу вібрацій, що генеруються рухомим складом, та їхнє поширення по рейці. Було показано, що різні типи поїздів (вантажні та пасажирські) генерують вібрації з різними частотними спектрами та амплітудами, що впливає на дальність їхнього поширення та загасання. Здатність ВОС, зокрема DAS, фіксувати ці вібрації дозволяє виявляти порушення цілісності рейки (тріщини, розриви) за зміною характеру загасання сигналу та сторонні предмети на колії за допомогою аналізу відбитих хвиль.

Ключовим досягненням цієї роботи є розширення парадигми використання волоконно-оптичних сенсорів. На відміну від існуючих підходів, які часто фокусуються на локальному виявленні подій безпосередньо в точці спрацьовування сенсора, моє дослідження пропонує новий спосіб використання вже відомої системи DAS. Я зосереджусь на аналізі вібраційних та акустичних сигналів, що генеруються

					ВКР.01.25.01.20.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

самим поїздом, для моніторингу ділянки колії попереду нього. Це дозволяє здійснювати проактивне виявлення потенційних небезпек, таких як дефекти рейки чи сторонні предмети, на значній відстані до наближення поїзда, надаючи додатковий час для реагування та уникнення інцидентів. Таким чином, я не лише покращую точність і надійність моніторингу, але й відкриваю принципово нові можливості для забезпечення безпеки руху на залізничному транспорті.

Застосування нейронних дозволяє ефективно обробляти великі обсяги сенсорних даних та вилучати з них значущу інформацію. Обґрунтований вибір таких архітектур, як CNN для вилучення просторових ознак та розпізнавання образів, мережі LSTM для моделювання часових послідовностей та захоплення довгострокових часових залежностей та автокодувальники для неконтрольованого виявлення аномалій, підкреслює їхню універсальність та ефективність у різних завданнях моніторингу. Порівняльний аналіз точності цих моделей свідчить про високі показники розпізнавання подій, особливо при використанні гібридних архітектур, таких як CNN-LSTM, які поєднують переваги обох підходів.

Запропонований алгоритм класифікації небезпеки, що включає три рівні (нормальний стан, попередження та критичний стан), дозволяє оперативно та адекватно реагувати на виявлені події. Це забезпечує своєчасне оповіщення персоналу та, за необхідності, вжиття негайних заходів для запобігання аваріям та мінімізації ризиків.

Таким чином, інтеграція волоконно-оптичних сенсорів та нейронних мереж відкриває нові можливості для створення інтелектуальних та надійних систем моніторингу залізничної інфраструктури. Ця синергія дозволить значно підвищити рівень безпеки руху поїздів, оптимізувати процеси технічного обслуговування, зменшити експлуатаційні витрати та забезпечити довгострокову цілісність залізничних мереж. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку більш складних гібридних моделей, вивчення передових методів навчання (таких як трансферне та напівконтрольоване навчання) та інтеграцію даних ВОС з іншими джерелами інформації для створення ще більш комплексних та стійких систем моніторингу.

					ВКР.01.25.01.20.ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Використані джерела

1. Railway Inspection using Non-Contact Non-Destructive Techniques [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.ijeas.org/download_data/IJEAS0708013.pdf. (Дата звернення: 02.05.2025).
2. Track Inspection Training - MARTA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.itsmarta.com/wayside-docs/Books%20For%20QR%20codes%20PDFs/Track%20Inspection%20Modules/Section%201-%20Track%20Inspection%20Introduction.pdf>. (Дата звернення: 03.05.2025).
3. Track Inspection Training - Atlanta - MARTA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.itsmarta.com/wayside-docs/Books%20For%20QR%20codes%20PDFs/Track%20Inspection%20Book.pdf>. (Дата звернення: 03.05.2025).
4. Advanced Rail Track Inspection Technologies for Enhanced Railway Safety - DMA Torino [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dmatorino.it/advanced-rail-track-inspection-technologies-enhanced-railway-safety/>. (Дата звернення: 04.05.2025).
5. Rail Integrity and Track Safety Standards - Federal Register [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.federalregister.gov/documents/2020/10/07/2020-18339/rail-integrity-and-track-safety-standards>. (Дата звернення: 04.05.2025).
6. Essential Guide to Railway Track Inspection - FlyPix AI [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://flypix.ai/blog/railway-track-inspection/>. (Дата звернення: 05.05.2025).
7. A review of applications of visual inspection technology based on image processing in the railway industry [Електронний ресурс] / Oxford Academic. – Режим доступу: <https://academic.oup.com/tse/article/1/3/185/5714252>. (Дата звернення: 05.05.2025).
8. FRA Track Safety Standards Compliance Manual - Federal Railroad Administration - Department of Transportation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/2020-07/2002-01_Track_Safety_Standards_0.pdf. (Дата звернення: 06.05.2025).
9. Manual Inspections vs. Automated Monitoring - Railmonitor [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://railmonitor.dk/manual-inspections-vs-automated-monitoring/>. (Дата звернення: 06.05.2025).
10. Railway Defect Detection Methods (part1) - Adortech [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://adortech.com/blog/railway-defect-detection-methods-part1>. (Дата звернення: 07.05.2025).
11. Industry Track Inspection - CN [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.cn.ca/-/media/Files/Customer-Centre/Track-Specifications/industry-track-inspection->

- [en.pdf?la=en%26hash=9A2E6CA60AD68FAF52D7D0D02F9FE892C585494D](#).
(Дата звернення: 07.05.2025).
- 12.flypix.ai [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://flypix.ai/blog/railway-track-inspection/#:~:text=Ultrasound%20testing%20is%20widely%20recognized,scan%20miles%20of%20track%20efficiently>. (Дата звернення: 08.05.2025).
- 13.Detection of Rail Defects Using NDT Methods - PMC - PubMed Central [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10220630/>. (Дата звернення: 08.05.2025).
- 14.Railroad Track Inspection | Rail Inspection Method [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://railroadrails.com/information/railroad-track-inspection/>. (Дата звернення: 09.05.2025).
- 15.Railway Inspection and measurement systems: Sensors, Devices, and Best Practices [Електронний ресурс] / Adortech. – Режим доступу: <https://adortech.com/blog/railway-inspection-and-measurement-systems-sensors,-devices,-and-best-practices>. (Дата звернення: 09.05.2025).
- 16.Why are Manual Inspection Methods Not Effective Nowadays? - Trident Information Systems [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://tridentinfo.com/why-are-manual-inspection-methods-not-effective-nowadays/>. (Дата звернення: 10.05.2025).
- 17.Freight Rail: Rigorous Daily Inspections | AAR - Association of American Railroads [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.aar.org/issue/freight-rail-safety-inspections/>. (Дата звернення: 10.05.2025).
- 18.Roger 1000 SBB, cheaper alternatives to conventional track inspection methods - Mermec [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mermecgroup.com/de/pressesaal/media-coverage/471/trimming-the-cost-of-track-inspection.php>. (Дата звернення: 11.05.2025).
- 19.Can Automated Track Geometry Inspection Replace Traditional Manual Inspection? An Update on the Industry's Track Inspection In [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://archive.wheel-rail-seminars.com/archives/2022/hh-papers/presentations/HH01%20Kerchof%20HH%20-%20Can%20autonomated%20track%20geometry%20inspection%20replace%20manual%20inspection.pdf>. (Дата звернення: 11.05.2025).
- 20.Dealing with disruptions in railway track inspection using risk-based machine learning [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9905508/>. (Дата звернення: 12.05.2025).
- 21.Track circuit - Wikipedia [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Track_circuit. (Дата звернення: 12.05.2025).

22. Train detection - Rail Engineer [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.railengineer.co.uk/train-detection/>. (Дата звернення: 13.05.2025).
23. How Track Circuits detect and protect trains - railwaysignalling.eu [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.railwaysignalling.eu/wp-content/uploads/2014/11/How-track-circuits-detect-and-protect-trains.pdf>. (Дата звернення: 13.05.2025).
24. Track Circuits and their Role in Train Movement - Intertech Rail [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.intertechrail.com/articles/track-circuits-and-their-role-in-train-movement>. (Дата звернення: 14.05.2025).
25. Track circuits explained - Network Rail [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.networkrail.co.uk/stories/track-circuits-explained/>. (Дата звернення: 14.05.2025).
26. Axle Counters vs Tracks Circuits | RSP - Rail Signalling & Power [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.rsprail.co.uk/axle-counters-vs-tracks-circuits/>. (Дата звернення: 15.05.2025).
27. Why Coded Track Circuits Can Be Longer - jonroma.net [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.jonroma.net/media/signaling/railway-signaling/1942/Why%20Coded%20Track%20Circuits%20Can%20Be%20Longer.pdf>. (Дата звернення: 15.05.2025).
28. Track Circuits - Siemens Mobility US [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mobility.siemens.com/us/en/portfolio/rail-infrastructure/components/track-circuits.html>. (Дата звернення: 16.05.2025).
29. Track Circuits - Diamond Valley Railway [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dvr.com.au/all-about-us/track-circuits.php>. (Дата звернення: 16.05.2025).
30. Axle counters [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://en.m.wikipedia.org/wiki/Axle_counter. (Дата звернення: 17.05.2025).
31. Inspection Techniques | FRA - Federal Railroad Administration [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://railroads.dot.gov/program-areas/track-and-structures/inspection-techniques>. (Дата звернення: 17.05.2025).
32. Axle Counters vs Tracks Circuits [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.rsprail.co.uk/axle-counters-vs-tracks-circuits>. (Дата звернення: 18.05.2025).
33. Train Detection Systems - YouTube [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.youtube.com/watch?v=aNjRHxQxI_o. (Дата звернення: 18.05.2025).
34. Track Circuit Shunting Performance Study - Federal Railroad Administration [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/2021-07/Track%20Circuit%20Shunt-A.pdf>. (Дата звернення: 19.05.2025).
35. Track circuits , Axle counters , Points and crossings - iriset [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://iriset.railnet.gov.in/content/coursmat/cli/coumate/CLI-02.pdf>. (Дата звернення: 19.05.2025).

36. Railway Track & Switch Monitoring - PhotonFirst [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.photonfirst.com/railway-track-switch-monitoring>. (Дата звернення: 20.05.2025).
37. RAIL-MOUNTED OPTICAL FIBER SENSORS FOR MONITORING TRACK TRANSITIONS - Federal Railroad Administration [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/2023-11/Rail-Mounted%20Optical%20Fiber%20Sensors.pdf>. (Дата звернення: 20.05.2025).
38. Optical fiber sensors in infrastructure monitoring: a comprehensive review [Електронний ресурс] / Oxford Academic. – Режим доступу: <https://academic.oup.com/iti/article/doi/10.1093/iti/liad018/7284228>. (Дата звернення: 21.05.2025).
39. Optical Sensors Improve Railway Safety | Optica [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.optica.org/about/newsroom/news_releases/2013/optical_sensors_improve_railway_safety/. (Дата звернення: 21.05.2025).
40. Optical Fiber Sensors and Sensing Networks: Overview of the Main Principles and Applications - PMC - PubMed Central [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9570792/>. (Дата звернення: 22.05.2025).
41. Railway Monitoring | Somni Solutions [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.somnisolutions.com/somni-railway-monitoring>. (Дата звернення: 08.04.2025). *Примітка: Тут дата звернення залишилася оригінальною, оскільки вона вже була вказана.*
42. Praetorian Fiber Optic Sensing for Railways | Hawk Measurement Systems [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.hawkfiber.com/praetorian-fiber-optic-sensing-for-railways/>. (Дата звернення: 22.05.2025).
43. Sensors are monitoring tracks and trains - Laser Components [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.lasercomponents.com/us/photonics-portal/knowledge-center/technical-articles/sensors-are-monitoring-tracks-and-trains/>. (Дата звернення: 23.05.2025).
44. Fiber Optic Monitoring for Railroad Infrastructure - Railway Fiber Optic Monitoring Systems | Hawk Measurement Systems - HAWK's Fiber Optic Sensing Solutions [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.hawkfiber.com/railways/>. (Дата звернення: 23.05.2025).
45. Fiber Optic Sensing in railways - Sonsonic [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sonsonic.com/en/start/fiber-optic-sensing-in-railways--3233/>. (Дата звернення: 24.05.2025).
46. Distributed Acoustic Sensing for railways explained - Sonsonic [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sonsonic.com/en/blog/distributed-acoustic-sensing-for-railways-explained--3240/>. (Дата звернення: 24.05.2025).
47. Fiber Optic Sensing in railways - Sonsonic [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sonsonic.com/en/blog/fiber-optic-sensing-in-railways--3233/>. (Дата звернення: 25.05.2025).

48. The Sense of a Sensor-Less Railway | Sensonic - Railway-News [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://railway-news.com/the-sense-of-a-sensor-less-railway/>. (Дата звернення: 25.05.2025).
49. Fiber Optic Train Monitoring with Distributed Acoustic Sensing: Conventional and Neural Network Data Analysis - PMC [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7014003/>. (Дата звернення: 26.05.2025).
50. A Review of Railway Infrastructure Monitoring using Fiber Optic Sensors - ResearchGate [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/337202918_A_Review_of_Railway_Infrastructure_Monitoring_using_Fiber_Optic_Sensors. (Дата звернення: 26.05.2025).
51. What is Distributed Acoustic Sensing – How Does it Work? - Railway International [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://railway-international.com/news/90996-what-is-distributed-acoustic-sensing-%E2%80%93-how-does-it-work>. (Дата звернення: 27.05.2025).
52. Distributed Acoustic Sensing for railways explained - Sensonic [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sensonic.com/en/blog/distributed-acoustic-sensing-for-railways-explained--3240/>. (Дата звернення: 27.05.2025).
53. Distributed Acoustic Sensing (DAS) | C-OTDR [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.apsensing.com/en/technology-and-products/distributed-acoustic-sensing>. (Дата звернення: 28.05.2025).
54. What is Distributed Acoustic Sensing and how does it monitor a Cable - YouTube [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=9YVzMXQTFcs>. (Дата звернення: 28.05.2025).
55. 5 Uses of Distributed Acoustic Sensing (DAS) - Sensonic [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sensonic.com/en/start/5-uses-of-distributed-acoustic-sensing-das--3265/>. (Дата звернення: 29.05.2025).
56. The Sense of a Sensor-Less Railway | Sensonic [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://railway-news.com/the-sense-of-a-sensor-less-railway/>. (Дата звернення: 29.05.2025).
57. Sensors are monitoring tracks and trains - Laser Components [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.lasercomponents.com/us/photonics-portal/knowledge-center/technical-articles/sensors-are-monitoring-tracks-and-trains/>. (Дата звернення: 30.05.2025).
58. Fiber Bragg Grating Sensors: Design, Applications, and Comparison with Other Sensing Technologies - MDPI [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/7/2289>. (Дата звернення: 30.05.2025).
59. What is a Fiber Bragg Grating? | FBG | Sensors - HBKWorld.com [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.hbkworld.com/en/knowledge/resource-center/articles/strain-measurement-basics/optical-strain-sensor-fundamentals/what-is-a-fiber-bragg-grating>. (Дата звернення: 31.05.2025).

60. Fiber Bragg Grating Sensors [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://bdt.semi.ac.cn/library/upload/files/2022/7/26111630826.pdf>. (Дата звернення: 31.05.2025).
61. RAIL-MOUNTED OPTICAL FIBER SENSORS FOR MONITORING TRACK TRANSITIONS - Federal Railroad Administration [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/2023-11/Rail-Mounted%20Optical%20Fiber%20Sensors.pdf>. (Дата звернення: 01.06.2025).
62. Comprehensive Review of Fiber Bragg Grating Sensors: Principles, Technologies, and Diverse Applications Across Industries [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.propulsionejournal.com/index.php/journal/article/download/7087/4602/12146>. (Дата звернення: 01.06.2025).
63. Real-Time Monitoring of Railway Traffic Using Fiber Bragg Grating Sensors - ResearchGate [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/224227307_Real-Time_Monitoring_of_Railway_Traffic_Using_Fiber_Bragg_Grating_Sensors. (Дата звернення: 02.06.2025).
64. Sensitivity Enhancement of Strain Sensing Utilizing a Differential Pair of Fiber Bragg Gratings - PMC - PubMed Central [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3355389/>. (Дата звернення: 02.06.2025).
65. (PDF) Smart Railway Traffic Monitoring Using Fiber Bragg Grating Strain Gauges [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/360330673_Smart_Railway_Traffic_Monitoring_Using_Fiber_Bragg_Grating_Strain_Gauges. (Дата звернення: 03.06.2025).
66. Real-Time Monitoring of Railway Traffic Using Fiber Bragg Grating Sensors - SciSpace [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://scispace.com/pdf/real-time-monitoring-of-railway-traffic-using-fiber-bragg-4et6wbcnnpn.pdf>. (Дата звернення: 03.06.2025).
67. Utilization of Fiber Optic Bragg Grating Sensing Systems for Health Monitoring in Railway Applications Authors: Н. У. Там [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://micronoptics.ru/uploads/library/documents/FBGs_Rail_Monitoring.pdf. (Дата звернення: 04.06.2025).
68. Real-time monitoring of railway traffic using fiber Bragg gratings - SPIE Digital Library [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/7653/1/Real-time-monitoring-of-railway-traffic-using-fiber-Bragg-gratings/10.1117/12.866460.full>. (Дата звернення: 04.06.2025).
69. Railroad Condition Monitoring Using Distributed Acoustic Sensing and Deep Learning Techniques - Digital Commons@Georgia Southern [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

- https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/context/etd/article/3946/viewcontent/auto_convert.pdf. (Дата звернення: 05.06.2025).
70. Application of FBG sensing technique for monitoring and early warning system of high-speed railway track conditions - ResearchGate [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/316429174_Application_of_FBG_sensing_technique_for_monitoring_and_early_warning_system_of_high-speed_railway_track_conditions. (Дата звернення: 05.06.2025).
71. A review of distributed acoustic sensing applications for railroad condition monitoring | Request PDF - ResearchGate [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/376456682_A_review_of_distributed_acoustic_sensing_applications_for_railroad_condition_monitoring. (Дата звернення: 06.06.2025).
72. Fiber Bragg Grating Sensors for Railways | Optromix [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://fibergratings.com/fiber-bragg-grating-sensors-for-railways/>. (Дата звернення: 30.04.2025).
73. Use of Fiber-Optic Sensors for the Detection of the Rail Vehicles and ... [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/1/134>. (Дата звернення: 30.04.2025).
74. Fiber optic sensing: The past, present, and exciting future - Sensuron [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sensuron.com/fiber-optic-sensing-the-past-present-and-exciting-future/>. (Дата звернення: 01.05.2025).
75. Fiber Optic Sensing - Products - Sun Telecom [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.suntelecom.cn/Fiber-Optic-Sensing.html>. (Дата звернення: 01.05.2025).
76. What is Fiber Optic Sensing? | VIAVI Solutions Inc. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.viavisolutions.com/en-us/resources/learning-center/what-fiber-optic-sensing>. (Дата звернення: 02.05.2025).
77. Rayleigh-Based Distributed Optical Fiber Sensing - MDPI [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/18/6811>. (Дата звернення: 02.05.2025).
78. Distributed Optical Fiber Sensing Based on Rayleigh Scattering - ResearchGate [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/profile/Luca-Schenato/publication/259850000_Distributed_Optical_Fiber_Sensing_Based_on_Rayleigh_Scattering/links/55ae129b08aee079921e642c/Distributed-Optical-Fiber-Sensing-Based-on-Rayleigh-Scattering.pdf. (Дата звернення: 03.05.2025).
79. Rayleigh scattering – Knowledge and References - Taylor & Francis [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://taylorandfrancis.com/knowledge/Engineering_and_technology/Electrical_%26_electronic_engineering/Rayleigh_scattering/. (Дата звернення: 03.05.2025).

80. Installation Considerations for Rail [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://fiberopticsensing.org/wp-content/uploads/sites/2/2023/03/FOSA-DFOS-Installation-Considerations-for-Rail.pdf>. (Дата звернення: 04.05.2025).
81. Machine Learning Applications in Optical Fiber Sensing: A ... [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/379453035_Machine_Learning_Applications_in_Optical_Fiber_Sensing_A_Research_Agenda. (Дата звернення: 04.05.2025).
82. Fiber Optic Dispersion and other Non-Linear Effects | OFS [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ofsoptics.com/fiber-optic-dispersion-and-other-non-linear-effects/>. (Дата звернення: 05.05.2025).
83. Identification of railway track damage using vibration signal characteristics [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.railvehicles.eu/pdf-201445-122881?filename=Identification%20of%20railway.pdf>. (Дата звернення: 05.05.2025).
84. Modelling the Environmental Effects of Railway Vibrations ... [Електронний ресурс] / ResearchGate. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/272497524_Modelling_the_Environmental_Effects_of_Railway_Vibrations_from_Different_Types_of_Rolling_Stock_A_Numerical_Study. (Дата звернення: 06.05.2025).
85. Full article: Railway-induced ground vibrations – a review of vehicle effects [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23248378.2014.897791>. (Дата звернення: 06.05.2025).
86. Benchmarking railway vibrations - Track, vehicle, ground and building effects - Account [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.pure.ed.ac.uk/ws/files/56997567/Benchmarking_Railway_Vibrations_Track_Vehicle_Ground.pdf. (Дата звернення: 07.05.2025).
87. Innovation in urban integration – mitigating noise and vibration from city center railways [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.pandrol.com/us/insight/innovation-in-urban-integration-mitigating-noise-and-vibration-from-city-center-railways/>. (Дата звернення: 07.05.2025).
88. Hunting oscillation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://en.m.wikipedia.org/wiki/Hunting_oscillation. (Дата звернення: 08.05.2025).
89. Different Types of Continuous Track Irregularities as Sources of Train-Induced Ground Vibration and the Importance of the Random Variation of the Track Support - MDPI [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/3/1463>. (Дата звернення: 08.05.2025).
90. Impact vibration behavior of railway vehicles: a state-of-the-art overview - SciEngine [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sciengine.com/doi/10.1007/s10409-021-01140-9>. (Дата звернення: 09.05.2025).

91. Prediction of Ground Vibration From Railways - Vibrationdata [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.vibrationdata.com/tutorials/Railways.pdf>. (Дата звернення: 09.05.2025).
92. Wave Propagation in Railway Tracks at High Frequencies | Request PDF – ResearchGate [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/225138105_Wave_Propagation_in_Railway_Tracks_at_High_Frequencies. (Дата звернення: 10.05.2025).
93. Bearing Fault Detection Vibration Analysis - How To Measure Vibration Frequency - NCD.io [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ncd.io/blog/bearing-fault-detection-vibration-analysis/>. (Дата звернення: 10.05.2025).
94. Wave Propagation in Railway Tracks at High Frequencies | Request PDF - ResearchGate [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/225138105_Wave_Propagation_in_Railway_Tracks_at_High_Frequencies. (Дата звернення: 11.05.2025).
95. Effective Strategies For Vibration Control in Tracks - Jekay International Track Pvt. Ltd. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://jekay.com/effective-strategies-for-vibration-control-in-tracks/>. (Дата звернення: 11.05.2025).
96. Generation and directional decomposition of guided waves for finite ... [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://academic.oup.com/jom/article/doi/10.1093/jom/ufad045/7480249>. (Дата звернення: 12.05.2025).
97. A Review on the Current Methods of Railway Induced Vibration Attenuations - IJSEA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ijsea.com/archive/volume6/issue4/IJSEA06041001.pdf>. (Дата звернення: 12.05.2025).
98. Rail defect detection based on vibration acceleration signals ... [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/261433929_Rail_defect_detection_based_on_vibration_acceleration_signals. (Дата звернення: 13.05.2025).
99. Vibration Analysis & Vibration Monitoring | Dynapar [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dynapar.com/technology/vibration-analysis/>. (Дата звернення: 13.05.2025).
100. Measuring Vibrations of Subway Tunnel Structures with Cracks - MDPI [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/9/2660>. (Дата звернення: 14.05.2025).
101. Vibration-based damage detection of rail fastener using fully convolutional networks | Request PDF - ResearchGate [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/349824432_Vibration-based_damage_detection_of_rail_fastener_using_fully_convolutional_networks. (Дата звернення: 14.05.2025).
102. Railway Wheel Flat and Rail Surface Defect Detection by Time-Frequency Analysis [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

- [https://www.researchgate.net/publication/262729154 Railway Wheel Flat and Rail Surface Defect Detection by Time-Frequency Analysis](https://www.researchgate.net/publication/262729154_Railway_Wheel_Flat_and_Rail_Surface_Defect_Detection_by_Time-Frequency_Analysis). (Дата звернення: 15.05.2025).
103. Bearing Fault Detection Vibration Analysis - How To Measure Vibration Frequency - NCD.io [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ncd.io/blog/bearing-fault-detection-vibration-analysis/>. (Дата звернення: 15.05.2025).
104. Defect Detection in Railroad Tapered-Roller Bearings Using Vibration Analysis Techniques - ScholarWorks @ UTRGV [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://scholarworks.utrgv.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1662&context=leg_etd. (Дата звернення: 16.05.2025).
105. Condition monitoring of railway track from car-body vibration using ... [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00423114.2020.1850808>. (Дата звернення: 16.05.2025).
106. Research on the algorithm for optimal selection of detection modes for rail crack detection [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.extrica.com/article/24007>. (Дата звернення: 17.05.2025).
107. Noncontact Ultrasonic Guided Wave Detection of Rail Defects - ResearchGate [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/238197166 Noncontact Ultrasonic Guided Wave Detection of Rail Defects](https://www.researchgate.net/publication/238197166_Noncontact_Ultrasonic_Guided_Wave_Detection_of_Rail_Defects). (Дата звернення: 17.05.2025).
108. A Review on Rail Defect Detection Systems Based on Wireless ... [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9459779/>. (Дата звернення: 18.05.2025).
109. Rail defect detection based on vibration acceleration signals ... [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/261433929 Rail defect detection based on vibration acceleration signals](https://www.researchgate.net/publication/261433929_Rail_defect_detection_based_on_vibration_acceleration_signals). (Дата звернення: 18.05.2025).
110. The Rail Surface Defects Recognition via Operating Service Rail Vehicle Vibrations - MDPI [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2075-1702/10/9/796>. (Дата звернення: 19.05.2025).
111. Electromagnetic Testing (ET) Method for NDT Inspections - ASNT [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.asnt.org/what-is-nondestructive-testing/methods/electromagnetic-testing>. (Дата звернення: 19.05.2025).
112. Analysis of Mechanical Vibration and Fault Detection of Railway Track Using Lab View System - ijireeice [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ijireeice.com/wp-content/uploads/2019/04/IJIREEICE.2019.7402.pdf>. (Дата звернення: 20.05.2025).

113. Elastic wave analysis for broken rail detection - ResearchGate [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/253968497_Elastic_wave_analysis_for_broken_rail_detection. (Дата звернення: 20.05.2025).
114. Vibration sensors for use in rail operations [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://hansfordsensors.com/blog/vibration-sensors-for-use-in-rail-operations/>. (Дата звернення: 21.05.2025).
115. Railway foreign body vibration signal detection based on wavelet analysis - Extrica [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.extrica.com/article/22319>. (Дата звернення: 21.05.2025).
116. Obstacle Detection on Railway Tracks Using Vibration Sensors and ... [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/283785668_Obstacle_Detection_on_Railway_Tracks_Using_Vibration_Sensors_and_Signal_Filtering_Using_Bayesian_Analysis. (Дата звернення: 22.05.2025).
117. Object Detection on Railway Track and Electricity Generation - ijrpr [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ijrpr.com/uploads/V6ISSUE2/IJRPR39115.pdf>. (Дата звернення: 22.05.2025).
118. Accelerometer vs Geophone: What's the best choice for vibration monitoring in construction? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sitehive.co/resources/accelerometer-vs-geophone-for-vibration-monitoring-in-construction>. (Дата звернення: 23.05.2025).
119. A Lightweight Deep Learning Approach for Detecting External ... [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1999-4893/18/2/101>. (Дата звернення: 23.05.2025).
120. Deep Learning for Optical Sensor Applications: A Review - MDPI [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/14/6486>. (Дата звернення: 24.05.2025).
121. Recent Advances in Machine Learning for Fiber Optic Sensor Applications - ResearchGate [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/355353719_Recent_Advances_in_Machine_Learning_for_Fiber_Optic_Sensor_Applications. (Дата звернення: 24.05.2025).
122. Optical Fiber Vibration Signal Recognition Based on the EMD ... [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/7/2016>. (Дата звернення: 25.05.2025).
123. Long-distance fiber optic vibration sensing using convolutional neural networks as real-time denoisers - Optica Publishing Group [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-28-26-39311>. (Дата звернення: 25.05.2025).
124. Remote Condition Monitoring of Rail tracks using Distributed Acoustic Sensing (DAS): A Deep CNN-LSTM-SW based Model - ResearchGate

- [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/377530752 Remote Condition Monitoring of Rail tracks using Distributed Acoustic Sensing DAS A Deep CNN-LSTM-SW based Model](https://www.researchgate.net/publication/377530752_Remote_Condition_Monitoring_of_Rail_tracks_using_Distributed_Acoustic_Sensing_DAS_A_Deep_CNN-LSTM-SW_based_Model). (Дата звернення: 26.05.2025).
125. Label-Free Anomaly Detection Using Distributed Optical Fiber Acoustic Sensing - Bohrium [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://bohrium.dp.tech/paper/arxiv/856118833025384449>. (Дата звернення: 26.05.2025).
126. Predictive maintenance based on anomaly detection using deep learning for air production unit in the railway industry | Request PDF - ResearchGate [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/355463810 Predictive maintenance based on anomaly detection using deep learning for air production unit in the railway industry](https://www.researchgate.net/publication/355463810_Predictive_maintenance_based_on_anomaly_detection_using_deep_learning_for_air_production_unit_in_the_railway_industry). (Дата звернення: 27.05.2025).
127. Pipeline Safety Early Warning Method for Distributed Signal using Bilinear CNN and LightGBM - Yiyuan Yang [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://yyysjz1997.github.io/Files/Yang_2021_ICASSP.pdf. (Дата звернення: 27.05.2025).
128. Baseline optimized autoencoder-based unsupervised anomaly detection in uncontrolled dynamic structural health monitoring | Request PDF - ResearchGate [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/390051478 Baseline optimized autoencoder-based unsupervised anomaly detection in uncontrolled dynamic structural health monitoring](https://www.researchgate.net/publication/390051478_Baseline_optimized_autoencoder-based_unsupervised_anomaly_detection_in_uncontrolled_dynamic_structural_health_monitoring). (Дата звернення: 28.05.2025).
129. A collection of machine learning assisted distributed fiber optic sensors for infrastructure monitoring - ResearchGate [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/367434914 A collection of machine learning assisted distributed fiber optic sensors for infrastructure monitoring](https://www.researchgate.net/publication/367434914_A_collection_of_machine_learning_assisted_distributed_fiber_optic_sensors_for_infrastructure_monitoring). (Дата звернення: 28.05.2025).
130. Integrated Sensor-Optics Communication System Using Bidirectional Fiber and FSO Channels and Hybrid Deep Learning Techniques - PubMed Central [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10611141/>. (Дата звернення: 29.05.2025).
131. Long-Distance Pipeline Safety Early Warning: A Distributed Optical Fiber Sensing Semi-Supervised Learning Method - Yiyuan Yang [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://yyysjz1997.github.io/Files/Yang_2021_IEEE_sensors_J.pdf. (Дата звернення: 29.05.2025).
132. Fiber Optic Train Monitoring with Distributed Acoustic Sensing: Conventional and Neural Network Data Analysis - ResearchGate [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/377530752>. (Дата звернення: 29.05.2025).

- ресурс]. – Режим доступу:
https://www.researchgate.net/publication/338600255_Fiber_Optic_Train_Monitoring_with_Distributed_Acoustic_Sensing_Conventional_and_Neural_Network_Data_Analysis. (Дата звернення: 30.05.2025).
133. Railroad condition monitoring with distributed acoustic sensing: an investigation of deep learning methods for condition detection - ResearchGate [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
https://www.researchgate.net/publication/379003235_Railroad_condition_monitoring_with_distributed_acoustic_sensing_an_investigation_of_deep_learning_methods_for_condition_detection. (Дата звернення: 30.05.2025).
134. Railway Monitoring and Train Tracking - AP Sensing [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.apsensing.com/es/application/rail-monitoring>. (Дата звернення: 31.05.2025).
135. Classification of Events Violating the Safety of Physical Layers in ... [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9738294/>. (Дата звернення: 31.05.2025).
136. Deep Learning for Optical Sensor Applications: A Review - PMC [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10386074/>. (Дата звернення: 01.06.2025).
137. Pipeline Safety Early Warning by Multifeature-Fusion CNN and LightGBM Analysis of Signals From Distributed Optical Fiber Sensors - Yiyuan Yang [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
https://yyysjz1997.github.io/Files/Yang_2021_TIM.pdf. (Дата звернення: 01.06.2025).
138. A Survey on Audio-Video Based Defect Detection Through Deep Learning in Railway Maintenance - DiVA portal [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1759093/FULLTEXT01.pdf>. (Дата звернення: 02.06.2025).