

здобувач другого рівня вищої освіти, М. В. КАНЄВСЬКИЙ,
кандидат технічних наук, С. О. ЗМІЙ,
(Український державний університет залізничного транспорту)
Д. С. КАНЄВСЬКИЙ



Фундаментальні принципи проактивного моніторингу рейок за допомогою волоконно-оптичних сенсорів

Анотація. Дослідження присвячене розробленню і теоретичному обґрунтуванню фундаментальних принципів створення проактивної системи моніторингу цілісності залізничних рейок на основі технології розподіленого акустичного зондування (DAS). Проаналізовано критичні недоліки існуючих методів інспектування, що функціонують у реактивній парадигмі і створюють «сліпі зони» між перевітками. Обґрунтовано, що DAS є оптимальним технологічним рішенням завдяки нечутливості до електромагнітних завад, можливості контролю ділянок до 100 км та економічності за рахунок використання сучасних волоконно-оптичних кабелів. Досліджено фізику поширення пружних хвиль у рейці, що дало змогу встановити компроміс між дальністю (низькі частоти) і деталізацією (високі частоти) моніторингу. Сформульовано головний науковий внесок — теоретичну основу для проактивного виявлення дефектів «з випередженням» через аналіз вібрацій, що поширюються рейкою попереду поїзда.

Ключові слова: залізничні рейки, моніторинг, розподілене акустичне зондування, DAS, волоконно-оптичні сенсори, проактивне виявлення, цілісність колії, пружні хвилі, безпека руху.

Вступ.

Дослідження, наведене у статті, належить до галузі залізничного транспорту, а саме інженерії та моніторингу колійної інфраструктури. Актуальність розглянутої проблеми обґрунтована кількома критичними факторами. По-перше, залізничні мережі є основними артеріями світової економіки, і надійність і безпека перевезень безпосередньо залежать від цілісності колії. З огляду на постійне зростання швидкостей та осьових навантажень напруження, що діють на рейки, експоненційно підвищуються, через що навіть незначний дефект може швидко призвести до катастрофічних наслідків [1].

Важливість цієї проблеми підтверджена статистикою: лише у США у 2018 році дефекти колії стали причиною 546 інцидентів, що завдали збитків на понад 97 мільйонів доларів [2]. Це підкреслює, що раннє виявлення пошкоджень є не просто питанням оптимізації обслуговування,

а фундаментальною вимогою для запобігання аваріям і збереження людських життів.

Сучасні методи контролю, такі як візуальні огляди та неруйнівний контроль, мають суттєві обмеження. Вони є переважно реактивними або періодичними, що створює небезпечні «сліпі зони» в часі, протягом яких дефекти можуть розвиватися непоміченими. Візуальні огляди є суб'єктивними і трудомісткими, тоді як інструментальні методи за допомогою повільних дефектоскопних вагонів залишають значні проміжки часу між перевітками.

Найгострішою є системна прогалина безпеки, що виникає внаслідок модернізації залізничних сигнальних систем. Традиційні рейкові кола, хоч і ненадійно, але виконували вторинну функцію виявлення повних розривів рейки. Сучасні системи, такі як лічильники осей, що впроваджувалися в рамках переходу до європейської системи управління рухом поїздів (ETCS), є значно надійнішими для виявлення поїздів, але мають фундаментальний недолік — вони абсолютно нездатні виявляти злами рейок.

Отже, модернізація ненавмисно усуває вторинний механізм безпеки, створюючи нагальну потребу в новій, спеціалізованій технології, яка б цілеспрямовано забезпечувала надійний моніторинг цілісності колії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблема моніторингу стану залізничної інфраструктури є предметом інтенсивних досліджень як вітчизняних, так і закордонних учених. Аналіз наукових публікацій останніх років свідчить про стійкий тренд переходу від традиційних періодичних методів інспектування до систем безперервного моніторингу в реальному часі.

Традиційні методи неруйнівного контролю (NDT), такі як ультразвуковий і вихрострумний контроль, продовжують вдосконалювати. Останні дослідження зосереджені на підвищенні точності та швидкості інспекції за допомогою нових типів датчиків, таких як фазовані антенні решітки в ультразвукових системах (PAUT) і техніка вимірювання поля змінного струму (ACFM) як альтернатива магнітопорошковому контролю [3]. Однак, незважаючи на ці вдосконалення, фундаментальна проблема періодичності таких перевірок залишається нерозв'язаною, що не дає змогу виявляти дефекти, які виникають між інспекціями.

Також значну увагу приділяють волоконно-оптичним сенсорам (FOS), які розглядають як технологію, здатну здійснити парадигмальний зсув у моніторингу. В оглядовій статті [4] підтверджено, що FOS є потужним інструментом для моніторингу залізничних систем завдяки їхній стійкості до електромагнітних завад, довговічності та можливості розподілених вимірювань.

Особливе місце серед FOS-технологій займає розподілене акустичне зондування (DAS). Дослідження останніх п'яти років демонструють його високий потенціал для вирішення широкого спектра завдань. У дослідженні [5] наведено результати польових випробувань в Австрії, які підтверджують, що DAS здатна ефективно виявляти розриви рейок, аналізуючи вібраційні сигнатури від проїжджаючого поїзда, але не перед ним.

Однак впровадження DAS створює нову проблему. У роботі [6] показано, що технологія генерує величезні обсяги складних, зашумлених даних, ручний аналіз яких неможливий. Це визначило наступний напрям досліджень – застосування штучного інтелекту (ШІ) і машинного навчання (МН) для автоматичної інтерпретації даних. Дослідження [7] демонструє високу ефективність гібридної моделі на основі МН точності в класифікації таких подій, як камінепади та падіння дерев, за даними DAS.

Отже, аналіз публікацій показує, що наукова спільнота активно працює над застосуванням DAS і ШІ для моніторингу стану елементів залізниць. Проте більшість існуючих досліджень зосереджені на

вирішенні конкретних прикладних завдань, таких як виявлення сторонніх вторгнень або відстеження поїздів. Невирішеною частиною загальної проблеми залишається глибоке розуміння фундаментальних фізичних принципів, що лежать в основі взаємодії поїзд-колія-дефект і її прояву у вібраційних даних, отриманих за допомогою DAS. Стаття присвячена цій невирішеній частині – аналізу фізики поширення пружних хвиль у рейках і їхньої модуляції дефектами для створення саме проактивної, а не просто реактивної системи моніторингу.

Мета дослідження

Метою статті є теоретичне обґрунтування та розроблення фундаментальних принципів для створення проактивної системи моніторингу цілісності залізничних рейок, що базовано на технології розподіленого акустичного зондування. Дослідження спрямоване на доведення можливості виявлення дефектів колії, аналізуючи вібраційні хвилі, що поширюються рейкою попереду рухомого складу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести критичний аналіз існуючих методів інспектування залізничної інфраструктури, виявити їхні фундаментальні обмеження та обґрунтувати необхідність переходу до проактивної парадигми моніторингу;
- описати фізичні принципи та переваги волоконно-оптичних сенсорів, зокрема технології розподіленого акустичного зондування, як основного інструменту для розв'язання поставленої проблеми;
- дослідити фізику генерації та поширення пружних хвиль у системі «рейка-шпала-баласт» за дією рухомого складу, включаючи аналіз типів хвиль і закономірностей їхнього згасання;
- сформулювати теоретичну основу для проактивного виявлення дефектів «із випередженням», визначивши фізичний компроміс між дальністю і деталізацією моніторингу.

Основна частина дослідження

1. Критичний огляд традиційних парадигм інспектування

Існуючі методи контролю, незважаючи на десятиліття вдосконалень, мають фундаментальні обмеження, які роблять їх недостатньо ефективними для сучасних вимог. Їхній головний недолік полягає в тому, що вони є переважно реактивними або періодичними, залишаючи небезпечні «сліпі зони» в часі, протягом яких можуть виникати і розвиватися критичні дефекти до моменту їх виявлення.

Фундаментальним методом контролю залишається візуальний огляд, виконуваний кваліфікованим персоналом. Інспектори шукають видимі дефекти, такі як тріщини, знос, пошкодження кріплень і просідання баласту [8]. Однак цей підхід є вкрай суб'єктивним і значною мірою залежить від досвіду, кваліфікації та пильності конкретного інспектора, а також зовнішніх умов, як-от погода та

освітлення. Для сучасних розгалужених залізничних мереж, що простягаються на тисячі кілометрів, часто через важкодоступну місцевість такий метод є логістично нестійким через високі витрати, значні трудові ресурси та небезпеку для самого персоналу [9].

Для об'єктивнішого оцінювання стану рейок застосовують інструментальні неруйнівні методи контролю (NDT), які допомагають виявляти приховані дефекти.

Метод ультразвукового контролю (УЗК) є ефективним для виявлення глибоких внутрішніх дефектів, таких як тріщини втоми. Однак потрібні висококваліфіковані оператори для інтерпретації сигналів, ретельної підготовки поверхні рейки, бо цей метод може бути «засліплений» поверхневими дефектами, які перешкоджають проникненню ультразвуку.

Вихрострумний контроль (ВСК) прийнятний для виявлення поверхневих і неглибоких підповерхневих дефектів у провідних матеріалах, але його глибина проникнення обмежена, а результати можуть залежати від геометрії рейки.

Магнітопорошковий контроль (МПК) високоточний для поверхневих тріщин у феромагнітних сталях, але потребує прямого контакту з рейкою і не виявляє внутрішніх пошкоджень.

Інші методи (радіографічний, капілярний) через високу вартість, вимоги щодо безпеки та низьку швидкість не прийнятні для широкомасштабного та безперервного моніторингу мережі [8].

Спільним і головним недоліком усіх методів NDT є їхня періодичність. Їх зазвичай застосовують за допомогою спеціалізованих, повільних дефектоскопних вагонів, що створює значні проміжки часу між перевірками, протягом яких дефект може досягти критичних розмірів.

Системи залізничної автоматики призначені в першу чергу для контролю руху, але і традиційно виконували вторинну функцію виявлення деяких типів пошкоджень колії. Основними такими елементами є рейкові колеса та лічильники осей. Основною функцією рейкових кіл є виявлення поїздом замикання електричного кола через колісні пари. Повний розрив рейки також розриває це коло,

що система може інтерпретувати як зайнятість ділянки, створюючи «відмовостійкий» сигнал. Однак ця здатність є ненадійною. Рейкові колеса вразливі до електромагнітних завад (ЕМІ), поганого стану баласту, затоплення та, що найважливіше, поганого електричного контакту (шунтування) через іржу, листя або мастило на рейках. Системи лічення, що побудовані на основі лічильників осей, є більш сучасними та надійними для виявлення поїздів, оскільки менш чутливі до стану рейок і баласту. Вони просто рахують кількість колісних пар, що виїжджають і виїжджають із ділянки. Однак вони мають фундаментальний недолік – лічильники осей абсолютно нездатні виявляти обриви рейок, що створює серйозну прогалину в безпеці [10].

Отже, у процесі модернізації залізничної інфраструктури виникає критична «прогалина безпеки». Перехід від старих рейкових кіл до більш надійних лічильників осей (наприклад у рамках впровадження систем ETCS) ненавмисно усуває вторинний, хоч і недосконалий, механізм виявлення обривів рейок. Це створює нагальну системну потребу в новій, спеціалізованій технології, яка б цілеспрямовано заповнила цю прогалину, забезпечуючи надійне виявлення порушень цілісності колії.

Перехід від реактивного до проактивного та предиктивного обслуговування

Аналіз традиційних методів (таблиця) показав, що вони належать до реактивної («знайшов-відремонтував») або періодичної («перевірив-запланував») парадигми. Сучасні вимоги щодо безпеки та економічної ефективності потребують переходу до проактивної та предиктивної моделі, яка дає змогу безперервно відстежувати стан інфраструктури та прогнозувати потенційні відмови ще до їх виникнення [11]. Такий підхід допомагає оптимізувати графіки ремонтів, мінімізувати простой, знизити експлуатаційні витрати і, найголовніше, запобігти аварійним ситуаціям.

Таблиця 1
Порівняльний аналіз технологій інспектування залізниць

Метод контролю	Основний об'єкт виявлення	Основні переваги	Критичні обмеження	Операційний режим	Вартість
Візуальний огляд	Видимі дефекти (великі тріщини, знос, пошкодження кріплень)	Простота, низька вартість обладнання	Суб'єктивність, трудомісткість, залежність від умов, невиявлення внутрішніх дефектів	Періодичний	Низька
Ультразвуковий контроль	Внутрішні дефекти (тріщини,	Висока чутливість до внутрішніх дефектів	Потребує спецобладнання та персоналу, повільний,	Періодичний	Висока

	порожнини)		може бути «засліплений» поверхневими дефектами		
Рейкові кола	Присутність поїзда (ненадійно), повний обрив рейки	Відмовостійка логіка для виявлення поїздів	Чутливість до ЕМІ та стану колії, помилки шунтування	Безперервний	Середня
Лічильники вісей	Присутність поїзда	Надійність у складних умовах, нечутливість до стану рейок	Нездатність виявляти обриви рейок	Безперервний	Середня
Розподілений акустичний сенсор (DAS)	Дефекти рейок, сторонні об'єкти, рух поїздів, несанкціонована діяльність	Безперервний моніторинг на великих відстанях, проактивність, багатофункціональність	Складність обробки даних, потреба в інтелектуальному аналізі	Безперервний	Низька (із використанням існуючих кабелів)

2. Волоконно-оптичні сенсори

Волоконно-оптичні сенсори (ВОС) працюють на основі аналізу змін у світловому сигналі, що поширюється через оптичне волокно, під впливом зовнішніх фізичних факторів, таких як деформація, температура або вібрація. Основою для розподілених сенсорних систем є природні явища розсіювання світла, що виникають через мікроскопічні неоднорідності в структурі скла. До них належать релєївське, бріллюєнівське та раманівське розсіювання. Аналізуючи характеристики зворотного розсіяного світла, можна з високою точністю визначити величину та місцезнаходження зовнішнього впливу вздовж усього волокна [12].

Для комплексного моніторингу залізничної інфраструктури можна використовувати різні типи ВОС, які ефективно доповнюють один одного.

Точкове зондування за допомогою волоконно-брегівських решіток (FBG)

FBG є точковими сенсорами, що являють собою ділянку волокна зі спеціально нанесеною періодичною структурою («решіткою») (рис. 1). Ця решітка відбиває світло лише на певній, чітко визначеній довжині хвилі (довжина хвилі Брега). Ця довжина хвилі змінюється пропорційно до механічної деформації або зміни температури. FBG ідеальні для високоточних вимірювань напружень у критично важливих точках інфраструктури, таких як мости, стрілочні переводи або зварні стики [12].



Рис. 1. Принцип роботи волоконного сенсора на основі решітки Брега

Розподілене температурне зондування (DTS)

Системи DTS використовують раманівське розсіювання, інтенсивність якого залежить від температури. Це дає змогу створювати безперервну

температурну карту вздовж усього кабелю, що є надзвичайно корисним для виявлення перегрівів, пожеж у тунелях, на станціях або в силових кабельних лініях.

Розподілене акустичне зондування (DAS)

Технологія DAS перетворює стандартний одномодовий телекомунікаційний кабель на суцільний масив із тисяч віртуальних мікрофонів або вібродатчиків (рис. 2). Принцип роботи базований на фазочутливій оптичній рефлектометрії в часовій області (Ф-OTDR). Високотехнологічний пристрій, що називають опитувачем (interrogator), посилає в оптоволокну когерентні лазерні імпульси та аналізує релєйське зворотне розсіювання. Будь-яка акустична або вібраційна хвиля, що діє на кабель (наприклад від руху поїзда, копання або деформації ґрунту), викликає мікроскопічні зміни у волокні. Ці зміни модулюють фазу розсіяного світла. Аналізуючи ці фазові зсуви та час повернення сигналу, система може з високою точністю виявити, класифікувати і локалізувати джерело вібрації. Головною перевагою DAS є здатність контролювати величезні відстані (до

100 км і більше) з одного опитувального блока, забезпечуючи безперервний моніторинг у реальному часі [13].

Застосування ВОС у залізничній галузі відкриває можливість для безперервного структурного моніторингу. Такі системи допомагають виявляти ледь помітні зміни в напружено-деформованому стані колії, що можуть свідчити про розвиток тріщин, просідання баласту чи ризик викривлення колії. Вони також ефективні для моніторингу природних небезпек, як-от зсуви ґрунту, фіксуючи вібрації, що передують катастрофічним подіям.

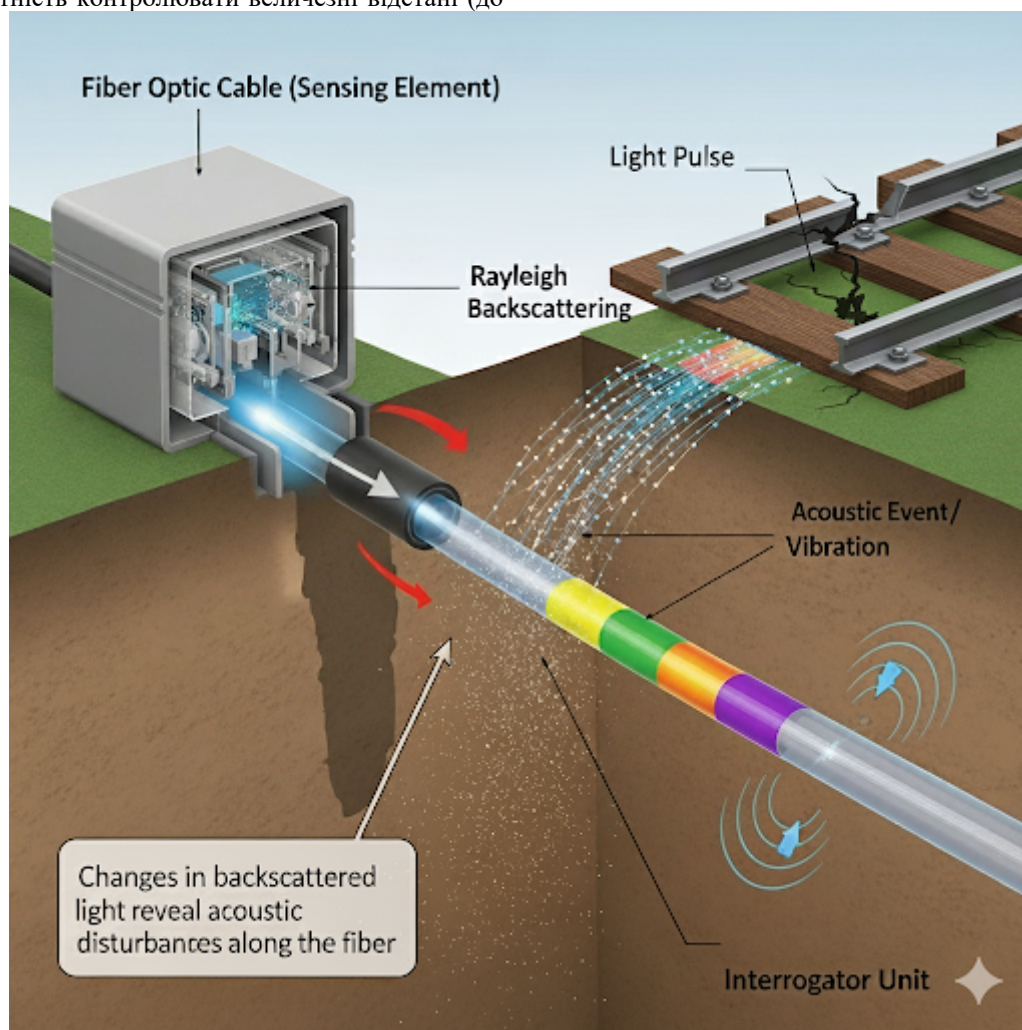


Рис. 2. Принцип роботи акустичного сенсора DAS

Волоконно-оптичні сенсори мають унікальні властивості, що роблять їх ідеальними для використання на залізницях.

Головною перевагою всіх волоконно-оптичних систем є їхня повна нечутливість до електромагнітних завад (ЕМІ). Оскільки сенсором є

діелектричне скляне волокно, а сигналом – світло, системи ВОС повністю несприйнятливі до електромагнітних полів від контактної мережі, силових кабелів і двигунів локомотивів. Це є вирішальною перевагою порівняно з будь-якими електронними датчиками.

Здатність DAS контролювати десятки кілометрів колії з метровою роздільною здатністю з однієї точки підключення є революційною для широкомасштабного моніторингу [12].

Найбільш значуща перевага полягає в можливості використання існуючих телекомунікаційних волоконно-оптичних кабелів, які вже прокладені вздовж більшості залізничних магістралей. Це радикально знижує вартість розгортання системи. Пасивна природа самого волокна забезпечує тривалий термін служби та мінімальні вимоги щодо обслуговування.

Технологія DAS пропонує не просто новий тип сенсора, а нову парадигму зондування. Замість розгортання тисяч окремих датчиків, кожен із яких потребує живлення, передавання даних та обслуговування, DAS дає змогу «активувати» уже існуючу пасивну інфраструктуру – телекомунікаційні кабелі. Один опитувальний блок, підключений до кінця такого кабелю, миттєво перетворює десятки кілометрів пасивного скла на щільну сенсорну мережу з тисячами віртуальних датчиків [14]. Цей перехід від «розгортання сенсорів» до «активації інфраструктури» є фундаментальним зрушенням, що робить економічно доцільним щільний, безперервний моніторинг усієї залізничної мережі.

3. Фізика вібрацій, що генеровані поїздом, і поширення хвиль у рейках

Основним джерелом вібрацій є динамічна взаємодія між колесами та рейками. Ця взаємодія як генерує вібрації під час нормального кочення через мікронерівності поверхонь, так і, що більш важливо, створює виразні, високоенергетичні перехідні процеси за наявності дефектів, таких як «повзуни» на колесах, тріщини, нерівності на зварних швах або стиках рейок. Додатковими, менш значущими, джерелами є силові установки та гальмівні системи поїзда.

Порівняльний аналіз вібраційних спектрів

Різні типи поїздів генерують вібраційні «сигнатури» з різними характеристиками, що є важливим для налаштування алгоритмів виявлення. Вантажні поїзди мають великі навантаження на вісь і відносно низькі швидкості. Це призводить до генерації потужних, низькочастотних вібрацій, які завдяки низькому коефіцієнту згасання можуть поширюватися на значні відстані вздовж рейки. Пасажирські та високошвидкісні поїзди мають менші навантаження на вісь, але значно вищі швидкості. Вони створюють вібрації з ширшим спектром, що включає значні високочастотні компоненти. Ці високочастотні коливання несуть детальну інформацію, але згасають значно швидше.

Динаміка поширення хвиль у системі рейка-шпала-баласт

Вібрації поширюються вздовж рейки у вигляді пружних хвиль. Розуміння їхньої поведінки є основним для інтерпретації даних. У рейці одночасно

поширено кілька типів хвиль, кожна з яких несе різну інформацію:

– поздовжні хвилі (Р-хвилі) – хвилі стиснення-розтягування, що є найшвидшими, швидкість їх поширення в сталі становить приблизно 5780 м/с;

– поперечні хвилі (S-хвилі) – хвилі зсуву, повільніші за поздовжні, зі швидкістю близько 3140 м/с у сталі;

– згинальні (флексуральні) хвилі виникають внаслідок вигину рейки під навантаженням і сильно залежать від жорсткості рейки та підтримки шпал.

Інтенсивність вібрації експоненційно зменшується з відстанню від джерела. Цей процес описано відомим законом експоненційного згасання

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha x}, \quad (1)$$

де I_0 – початкова інтенсивність;

x – відстань;

α — коефіцієнт згасання.

Критично важливо, що коефіцієнт згасання α сильно залежить від частоти. Ця залежність є фундаментальним фізичним обмеженням системи, що визначає компроміс між дальністю виявлення та деталізацією інформації.

Використовуючи вираз (1), можна розрахувати максимальну теоретичну відстань, на якій сигнал від поїзда може бути надійно виявлений сенсором. Ця відстань залежить від початкової потужності сигналу (P_0), чутливості сенсора (P_{sensor}) і коефіцієнта згасання (α). Максимальну відстань виявлення (L_{max}) визначають як

$$L_{\text{max}} \leq \frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{P_0}{P_{\text{sensor}}}\right).$$

Наприклад, для низькочастотних вібрацій вантажного поїзда (із $\alpha \approx 0.0005$ 1/м) сигнал може поширитися на відстань до 9.21 км, перш ніж його інтенсивність впаде до 1 % початкової. Для високочастотних вібрацій пасажирського поїзда (із $\alpha \approx 0.002$ 1/м) ця відстань становить лише близько 2.3 км.

4. Теоретична основа для проактивного виявлення «із випередженням»

Синтез вищезазначених пунктів формулює центральну гіпотезу дослідження: сталева рейка діє як хвилевід, по якому вібрації, що генеровані поїздом, поширюються вперед на значну відстань. Аналізуючи ці вібрації за допомогою системи DAS, можна діагностувати стан колії на кілька кілометрів попереду поїзда, що надає критично важливий час для реагування на загрози.

Фізика поширення хвиль накладає фундаментальний компроміс між дальністю

виявлення та його деталізацією. Низькочастотні компоненти вібрації, що генеровані великою масою поїзда, поширюються на великі відстані (понад 9 км для вантажних поїздів), що дає змогу виявляти присутність поїзда здалеку. Однак високочастотні компоненти, які несуть детальну інформацію про гострі, короткочасні події, такі як удар колеса об мікротріщину, загасають набагато швидше (у межах 1-2 км). Це означає, що система має багаторівневу здатність до виявлення: дальня зона для виявлення присутності та великих перешкод, середня зона для виявлення значних розривів і ближня зона для діагностики дрібних дефектів.

Висновки

Проведене дослідження обґрунтовує фундаментальні принципи для створення проактивної системи моніторингу цілісності рейок на основі технології розподіленого акустичного зондування (DAS), що заповнює існуючу наукову прогалину. Доведено, що сучасні методи контролю є реактивними і створюють небезпечні «сліпі зони» між перевірками, а модернізація сигнальних систем поглиблює «прогалину безпеки». Обґрунтовано, що DAS є оптимальним рішенням завдяки нечутливості до електромагнітних завад, можливості контролю ділянок до 100 км та економічності за рахунок використання існуючих кабелів. Досліджено фізику поширення пружних хвиль у рейці, що дало змогу встановити компроміс між дальністю (низькі частоти, > 9 км) і деталізацією (високі частоти, < 2 км) моніторингу. Сформульовано головний науковий внесок — теоретичну основу для проактивного виявлення дефектів «із випередженням», аналізуючи вібрації, що поширюються рейкою попереду поїзда. Це закладає теоретичну базу для переходу від реактивного реагування до предиктивного контролю. Перспективи подальших робіт включають розроблення алгоритмів машинного навчання для аналізу даних і проведення польових випробувань для валідації моделі.

Список використаних джерел

1. Xiong L., Jing G., Wang J., Liu X., Zhang Y. Detection of Rail Defects Using NDT Methods. *Sensors (Basel)*. 2023 May. 10;23(10):4627. doi: 10.3390/s23104627. PMID: 37430540; PMCID: PMC10220630.
2. Yu Qian. Intelligent railroad inspection and monitoring. *Front. Built Environ.*, 12 April 2024 Sec. *Geotechnical Engineering*. 2024. Vol. 10. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1389092>.
3. Rail Testing - Non-Destructive Testing for Railways — Eddyfi. URL: <https://www.eddyfi.com/en/application/railway-testing>.
4. Sasy Chan Y. W., Wang H.-P., Xiang P. Optical Fiber Sensors for Monitoring Railway Infrastructures: A Review towards Smart

- Concept. *Symmetry*. 2021. 13. 2251. <https://doi.org/10.3390/sym13122251>.
5. Wagner A., Nash A., Michelberger F., Grossberger H., Lancaster G. The Effectiveness of Distributed Acoustic Sensing (DAS) for Broken Rail Detection. *Energies*. 2023. 16. 522. <https://doi.org/10.3390/en16010522>.
 6. Md Arifur Rahman, Hossein Taheri, Fadwa Dababneh. A review of distributed acoustic sensing applications for railroad condition monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 15 February 2024. Vol. 208. 110983. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110983>.
 7. Wu D., Liang Q.-Q., Hu B.-X., Zhang Z.-T., Wang X.-F., Jiang J.-J., Yi G.-W., Zeng H.-Y., Hu J.-Y., Yu Y. et al. Research Progress of Event Intelligent Perception Based on DAS. *Sensors*. 2025. 25. 5052. <https://doi.org/10.3390/s25165052>.
 8. Essential Guide to Railway Track Inspection - FlyPix AI. URL: <https://flypix.ai/blog/railway-track-inspection/> (дата звернення: 01.09.2025).
 9. Gong W., Akbar M. F., Jawad G. N., Mohamed M. F. P., Wahab M. N. A. Nondestructive Testing Technologies for Rail Inspection: A Review. *Coatings*. 2022. 12. 1790. <https://doi.org/10.3390/coatings12111790>.
 10. Автоматизовані системи керування рухом поїздів на станціях : навч. посіб. / В. І. Мойсеєнко, В. О. Сотник, С. О. Змій, О. В. Щєбликіна. Харків: УкрДУЗТ, 2024. 184 с.
 11. Railway Defect Detection Methods | ADORTech. URL: <https://adortech.com/blog/railway-defect-detection-methods-part1> (дата звернення: 01.09.2025).
 12. Castillo-Mingorance J. M., Sol-Sánchez M., Moreno-Navarro F., Rubio-Gámez M. C. A Critical Review of Sensors for the Continuous Monitoring of Smart and Sustainable Railway Infrastructures. *Sustainability*. 2020. 12. 9428. <https://doi.org/10.3390/su12229428>.
 13. Du T. L., Hartog A., Hilton G., Didelet R. An Analysis of Railway Activity Using Distributed Optical Fiber Acoustic Sensing. *Sensors*. 2025. 25. 4180. <https://doi.org/10.3390/s25134180>.
 14. Gorshkov B. G., Yüksel K., Fotiadi A. A., Wuilpart M., Korobko D. A., Zhirnov A. A., Stepanov K. V., Turov A. T., Konstantinov Y. A., Lobach I. A. Scientific Applications of Distributed Acoustic Sensing: State-of-the-Art Review and Perspective. *Sensors*. 2022. 22. 1033. <https://doi.org/10.3390/s22031033>.
- FUNDAMENTAL PRINCIPLES OF PROACTIVE RAIL MONITORING USING FIBRE OPTIC SENSORS**
second-level higher education student, Ukrainian State University of Railway Transport M. V. Kanevskyy, candidate of Technical Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport S. O. Zmii, D. S. Kanevskyy

Abstract. *This research is dedicated to the development and theoretical substantiation of the fundamental principles for creating a proactive system for monitoring the integrity of railway rails based on Distributed Acoustic Sensing (DAS) technology. The study addresses the critical shortcomings of existing inspection methods, which are predominantly reactive or periodic, leading to dangerous «blind spots» in time during which critical defects can emerge and develop unnoticed. A key issue highlighted is the systemic «safety gap» arising from the modernization of signaling systems, where the replacement of traditional track circuits with more reliable axle counters inadvertently eliminates a secondary, albeit imperfect, mechanism for detecting complete rail breaks. The paper substantiates that DAS is the optimal technological solution to fill this gap. Its key advantages are analyzed in detail: complete immunity to electromagnetic interference (EMI) from power lines and traction motors, the ability to monitor vast track sections (up to 100 km) from a single interrogator unit, and significant economic efficiency achieved by leveraging existing telecommunication fiber-optic cables already laid along most railway lines. This approach signifies a paradigm shift from «deploying sensors» to «activating infrastructure». The physics of the generation and propagation of elastic waves in the «rail-sleeper-ballast» system under the influence of rolling stock is thoroughly investigated. It is established that the rail acts as an effective waveguide for longitudinal, transverse, and flexural waves. A crucial finding is the strong frequency dependence of the attenuation coefficient, which defines a fundamental trade-off between the range and detail of monitoring. Low-frequency components propagate over long distances (> 9 km), enabling early train detection, while high-frequency components, which carry detailed diagnostic information about localized defects, attenuate rapidly (< 2.3 km). The main scientific contribution of this work is the formulation of a theoretical basis for proactive, «look-ahead» defect detection. The central hypothesis is that a moving train can be considered a mobile source of acoustic energy, and by analyzing the vibrational waves propagating ahead of it, it is possible to diagnose the condition of the track several kilometers in advance, providing critical time to respond to threats. This moves the state of the art from reactive analysis of past events to the pre-emptive identification of hazards. Future research directions are outlined, emphasizing the need for advanced machine learning algorithms for real-time data analysis and extensive field trials to validate the theoretical model.*

Keywords: *railway rails, monitoring, distributed acoustic sensing, DAS, fiber optic sensors, proactive detection, track integrity, elastic waves, traffic safety.*

Maksym Kanevskiy, second-level higher education student of the Department of Automation and Computerized Train Control, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: kanevskiy2024@kart.edu.ua. <https://orcid.org/0009-0007-6284-0311>.

Serhii Zmii, Associate Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: zmii.sergii@kart.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0002-7974-5181>. Scopus Author ID: 57192821601.

David Kanevskyy, student of Ardrey Kell High School, Charlotte, USA. E-mail: tarassekanev@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0005-7461-337>