

УДК 656.25

В. І. ГАВРИЛЮК

^{1*} Каф. «Автоматики та телекомунікацій», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, г. Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта v.i.havryliuk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-9914-5733

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ РОБОТІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ РЕЙКОВИХ КІЛ

Мета. Метою роботи є проведення аналітичного огляду публікацій з використання роботів для інспектування інфраструктурних об'єктів залізничного транспорту, розгляд проблем і перспектив розвитку робототехнічних комплексів на залізницях, а також формулювання можливих напрямків розробки мобільних роботів для моніторингу параметрів рейкових кіл. **Методи.** Вимірювання і аналіз параметрів сигнального струму рейкових кіл, автоматичної локомотивної сигналізації, зворотного тягового струму в рейках для своєчасного виявлення збоїв в роботі рейкових кіл. **Результати.** Визначено деякі можливі напрямки розробки мобільних роботів для моніторингу параметрів рейкових кіл. Обладнання мобільного робота котушками АЛСН, супутниковою навігацією, радіозв'язком та пристроями автомашиніста забезпечить безпеку руху під час тестових поїздок по перегону. Застосування зазначених пристроїв і технологій легко реалізується шляхом використання відповідних систем аналогічно до існуючих на залізничному транспорті. Вимірювальна частина складається з пристроїв накопичення і запису сигналів рейкових кіл з одночасним записом положення системи на перегоні за сигналами від супутникової навігаційної системи, колісних датчиків та корегування результатів при проходженні границь блок-дільниць. Аналіз кодових параметрів сигнального струму дозволяє визначати сталі тенденції в їх зміні і, відповідно, передбачити виникнення збоїв. Контроль виконання шунтового режиму може бути реалізовано з застосуванням першої осі робота-платформи з нормативним електричним опором. Вимірювання диференційного струму і загального зворотного тягового струму в рейках дозволяє контролювати його спектральний склад, а також коефіцієнт асиметрії тягового струму в рейках. Зміни загального і диференційного струму в рейках при проходженні ізолюючих стиків дають інформацію про їх технічний стан. Мобільний робот може провести додаткові виміри на ізолюючих стиках при зупинці. Використання високочутливих сенсорів дозволить контролювати сигнальний струм в тональних рейкових колах. **Практична значимість.** Отримані результати можуть бути використані при розробці системи безперервного моніторингу рейкових кіл, що дозволить підвищити безпеку руху поїздів і зменшити експлуатаційні витрати. Запропонована методика дозволяє не тільки виявляти несправності в рейкових колах, але й прогнозувати їх стан, що дозволить більш ефективно планувати технічне обслуговування та знизити ризики збоїв у їх роботі.

Ключові слова: роботи, моніторинг технічного стану, рейкові кола, контроль параметрів

Вступ

Залізничний транспорт є одним з найважливіших видів транспорту, що забезпечує основний обсяг перевезень пасажирів і вантажів. Безпека руху поїздів забезпечується всім комплексом організаційних та технічних заходів, спрямованих на забезпечення безаварійної роботи та утримання в постійній справності залізничних споруд, колій, рухомого складу, обладнання, механізмів та пристроїв.

Зменшити трудові та матеріальні витрати на проведення планово-попереджувального обслуговування технічних систем залізничного транспорту, а також забезпечити своєчасне виявлення їх перед-відмовних станів можливо удосконаленням діагностичних комплексів, у тому числі використання робототехнічних систем. Однак, незважаючи на перспективність, застосування

роботів для інспекції інфраструктури залізниць поки що дуже обмежене, що пов'язано з низкою організаційних, нормативних і технічних специфічних вимог на залізничному транспорті і, в першу чергу, з необхідністю забезпечення високого рівня безпеки руху поїздів.

Мета роботи

Метою роботи є проведення аналітичного огляду публікацій з використання роботів для інспектування інфраструктурних об'єктів залізничного транспорту, розгляд проблем і перспектив розвитку робототехнічних комплексів на залізницях, а також формулювання можливих напрямків розробки мобільних роботів для моніторингу параметрів рейкових кіл.

Аналіз останніх досліджень

Використання роботів для інспекції залізничної інфраструктури набуло значного поширення в останні роки завдяки прогресу сенсорних технологій, штучного інтелекту та машинного навчання [1-3]. Розглянуті роботи призначені для перевірки та обслуговування різних компонентів залізничної інфраструктури, включаючи колії, мости, тунелі та рухомий склад.

Залізнична колія працює в складних умовах, пов'язаних з механічним впливом поїздів, а саме вібрацією, ударними навантаженнями, впливом погодних умов, забрудненням баласту, корозією. Це приводить до постійної деградації рейок, шпал, кріплень і навіть до зламу рейок. Так, у Європі на 215720 км залізничних колій щороку виявляють 4300 зламаних рейок, що є основною причиною сходів поїздів з рейок.

Витрати на технічне обслуговування та ремонт зламаних рейок становлять близько 2 млрд. євро на рік [4]. Внаслідок зростання швидкості руху поїздів, існує гостра необхідність в оптимізації режиму технічного обслуговування і підвищенні надійності залізничної інфраструктури.

Використання роботів підвищує безпеку, зменшуючи суб'єктивний вплив людини на результати обстеження технічного стану залізничних об'єктів. Роботи можуть працювати в суворих умовах, включаючи повну темряву і виконувати завдання з високою точністю з передачею результату перевірки в режимі реального часу.

В одному з перших досліджень з використання роботів для обслуговування колій [5] представлено короткий виклад комплексного дослідницького проекту STAR-TRACK, який включав концептуалізацію, проектування, розробку та оцінку автономної команди мультироботів для технічного обслуговування з заміною колії на лінії Shinkansen. Було розроблена технологія для мультироботів з відкручування болтів після виявлення дефектів рейки та автоматичне встановлення нових кріплень [5]. В роботі [6] наведені результати для перевірки залізничних переїздів, а в [7], виявлення несправного профілю рейок. В [8] описано робот-платформу Felix (рис. 1), розроблений фірмою Locomi, для контролю колії, стрілочних переводів і перехресть під час руху з максимальною робочою швидкістю 5 км/год.

Використання нейронних мереж з розпізнаванням образів дозволяє виявляти численні дефекти на поверхнях рейок, кріпильних елементах, зв'язках тощо. Такі роботи можуть працювати автономне або управлятися дистанційно,

вони оснащені датчиками та камерами для виявлення незначних дефектів і зношення рейкової колії, що можуть бути непомітними для людського ока. Несправності рейок (тріщини, злами, дефекти кріплення, відсутність гайок і болтів) виявляються оптичними сенсорами з контролем зображення, а також за допомогою інфрачервоного та ультразвукового датчика. Сигнали від датчиків обробляються мікроконтролером.

При виявленні несправності робот-платформа зупиняється і надсилається інформація про координати поломки. В [9] розглянуто платформа Zentrak від компанії Voestalpine Railway Systems, що надає комплексний моніторинг стану колійної інфраструктури і дозволяє проводити превентивне обслуговування та знижувати ризики відмов.



Рис. 1. Мобільний робот Felix

Обслуговування і діагностика рухомого складу

Сучасні поїзди оснащуються вбудованими діагностичними системами, які постійно контролюють стан ключових компонентів, таких як гальмівні системи, двигуни, системи безпеки та клімат-контролю. Збір і аналіз цих даних дозволяє знизити експлуатаційні витрати і підвищити надійність перевезень. Як приклад мобільного робота для огляду і перевірки стану рухомого складу можна навести приклад робота ANYmal (рис. 2) [10].



Рис. 2. Мобільний робот ANYmal.

Роботи ANYmal здатні переміщатися вздовж рухомого складу, а також під поїздами, що дозволяє їм виявити навіть дрібні дефекти ходової частини рухомого складу, такі як тріщини та знос колісних пар на ранніх стадіях. Роботи ANYmal щодня проводять сотні автономних перевірок складних конструкцій, навіть у повній темряві, підвищує безпеку та ефективність візуальних перевірок і надійність поїздів. Прогнозне обслуговування допомагає зменшити людські та матеріальні витрати, що робить ANYmal ідеальним рішенням для галузі.

Системи сигналізації та електропостачання

Надійність системи сигналізації та електропостачання є критично важливою для забезпечення безпеки руху поїздів. Роботизовані комплекси та автоматизовані системи моніторингу дозволяють контролювати якість електроживлення, стан сигнальних систем, роботу стрілочних переводів та інших підсистем.

Наприклад, система моніторингу потужності сигналів (SPM) відстежує доступність і якість електропостачання для життєво важливих систем, таких як сигналізація, залізничні переїзди та стрілочні переводи [12]. Це дозволяє своєчасно виявити та усунути відхилення параметрів системи, що можуть викликати збої в її роботі.

Проблеми та обмеження, що ускладнюють застосування роботів на залізниці

Залізнична інфраструктура складна і динамічна, включає в себе різні підсистеми з різними компонентами, працює і вдень і вночі, в різних погодних умовах, включаючи екстремальні. Це ускладнює використання роботів на залізничному транспорті.

До проблем та обмежень, що ускладнюють застосування роботів на залізниці, можна віднести наступне.

1. Складність і динамічність роботи залізниці, що має велику протяжність і цілодобовий рух поїздів. Роботи по обслуговуванню залізничних систем є комплексними і трудомісткими.

2. Технологічна інтеграція роботизованих систем з наявною залізничною інфраструктурою та технологіями є складним завданням в зв'язку з необхідністю забезпечення відповідності проведення робіт існуючим нормативним стандартам. Інтеграція роботів з існуючою залізничною інфраструктурою та системами може бути складною.

3. Обробка та аналіз даних. Величезний обсяг

даних, що збираються інспекційними роботами, вимагає надійних систем обробки даних. Для аналізу цих даних використовуються глибоке навчання, але розробка точних і надійних алгоритмів залишається проблемою.

4. Вартість та обслуговування. Початкові інвестиції в роботизовані інспекційні системи можуть бути високими, а обслуговування цих систем потребує спеціальних знань та ресурсів. Однак довгострокові вигоди з точки зору зниження витрат і підвищення ефективності часто переважають початкові витрати.

5. Екологічні та експлуатаційні обмеження.

6. Проблеми з регулюванням і безпекою. Використання роботів для обслуговування колій викликає занепокоєння з питань регулювання та безпеки.

Перспективні технології для вдосконалення роботів

В останнє десятиліття відбуваються якісні зрушення у робототехніці завдяки розвитку наступних технологій.

1. Передові сенсорні технології. Розвиток сенсорних технологій, поява нових датчиків і вдосконалення існуючих розширюють можливості інспекційних роботів, що дозволяє проводити більш точні перевірки.

2. Штучний інтелект та машинне навчання. Подальші досягнення в галузі ШІ та машинного навчання дозволяє проводити більш складний аналіз даних та попереднє обслуговування, скорочує час простою поїздів та підвищує надійність залізничної інфраструктури.

3. Стандартизація та регулювання. Встановлення стандартизованих процедур і правил для використання роботизованих інспекційних систем має вирішальне значення для їх широкого впровадження та інтеграції в існуючі практики обслуговування залізниць.

Мобільні роботи для моніторингу рейкових кіл

Рейкові кола (РК) використовуються в більшості автоматичних систем керування рухом поїздів як первинний датчик положення рухомої одиниці на певній блок-ділянці, а також цілісності рейок, тому їх надійна робота напряму впливає на безпеку руху поїздів.

Для забезпечення безвідмовної роботи рейкових кіл, проводять їх планово-попереджувальне обслуговування згідно затвердженому графіку з оглядом елементів РК і вимірюванням напруги і струму на певних елементах РК. Також

періодично проводять запис струму автоматичної локомотивної сигналізації (АЛСН) спеціально обладнаними вагон-лабораторіями.

Використання мікропроцесорних систем керування рухом поїздів надає додаткові можливості для автоматичного контролю напруги і струму в кожному рейковому колі, але здебільше це відноситься до РК с централізованим розміщенням апаратури.

Контроль напруги на релейному і живлячому кінці РК проводиться тільки на належність її до певного інтервалу, що регламентується регулювальними таблицями.

Такий контроль може спростити працю обслуговуючого персоналу, але принципово не додає нових якісних можливостей з діагностування РК та не дозволяє визначити дефекти в РК на ранніх стадіях і, відповідно, не зменшує кількість планових обслуговувань з виходом персоналу на колію.

Вимірювання напруги тільки в релейній на станції є важливим чинником, але не достатнім для прогнозування технічного стану РК. До того ж, рейкова лінія є неоднорідною як по довжині так і в поперечній площині за рахунок, наприклад, підключення до крайньої рейки провідників заземлення металевих конструкцій, розташованих поблизу колії.

Діюча напруга на приймачі рейкового кола може бути в межах відповідно до регулювальних таблиць, але сигнальний струм в РК може бути суттєво спотворений [12] внаслідок значних завад в рейках від зворотного тягового струму поїздів або високовольтних ліній передачі (рис. 3).

Можливість контролю струму вздовж рейок, в місцях їх локальної неоднорідності, а також при переїзді через ізолюючі стики дає інформацію, що може бути використана для моніторингу технічного стану РК і виявлення в них дефектів на ранніх стадіях.

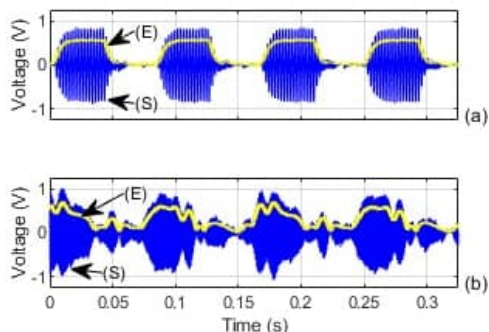


Рис. 3. Часові залежності напруги на колійному приймачі тонального рейкового кола та їх огинаючої для невеликих (а) і значних (б) спотворення сигнального струму РК

Зазначені функції можна реалізувати на основі мобільної платформи-робота, на зразок наведеному на рис. 1. Датчики і додаткове обладнання робота залежить від конкретних функціональних призначень. Обладнання мобільного робота котушками АЛСН, супутниковою навігацією, радіозв'язком з можливістю телекерування та пристроями автомашиніста дозволить безпечно рухатися по перегону.

Реалізація контролю АЛСН на платформі робота легко реалізується у відповідності до існуючих технологій, що використовується у вагон-лабораторіях сигналізації і зв'язку. Вимірювальна частина складається з пристроїв накопичення і запису сигналів з рейкових кіл з паралельним записом положення системи на перегоні, що визначається за сигналами від супутникової навігаційної системи, колісних датчиків та корелюється з проходженням границь блок дільниць прив'язкою до координати на перегоні. Програмне забезпечення може бути аналогічним до існуючих систем, що успішно використовуються на залізницях, наприклад, до системи КЛУБ. Це дозволить легко інтегруватися в існуючі технології контролю АЛСН.

Аналіз кодових параметрів сигнального струму з додатковим аналізом у часовій і частотній області може дозволити визначити сталі тенденції в зміні часових параметрів сигнального струму на певній ділянці. Такий аналіз дозволить передбачити заздалегідь появу збоїв у роботі системи, що можуть виникнути при одночасному впливі додаткових несприятливих факторів, наприклад зменшення опору ізоляції баласту, електромагнітних завад (ЕМЗ).

Контроль виконання шунтового режиму з використанням такого робота можна реалізувати з використанням першої осі платформи з нормативним електричним опором (0.06 Ом). Виміри струму через вісь дозволять контролювати шунтовий режим РК в заданих точках колії.

За допомогою мобільного робота можна вимірювати диференційний струм в рейках при тязі змінного струму, а при використанні ще двох приймальних котушок з узгодженим їх включенням можна контролювати загальний зворотний тяговий струм у двох рейках, визначити його спектральний склад, і коефіцієнт асиметрії тягового струму в рейках.

На основі контролю загального і диференційного струму в рейках при проходженні ізолюючих стиків можна визначити їх технічний стан. Також при появі невизначеності у результатах, мобільний робот може зупинитися над ізолюючим стиком і провести додаткові виміри [13].

При використанні високочутливих сенсорів електромагнітного поля можна також контролювати сигнальний струм в тональних рейкових колах.

Висновки

Проведено аналітичний огляд останніх досліджень з використання роботів для інспектування систем залізничного транспорту.

Розглянуто перспективи і проблеми розвитку, а також можливі напрямки використання мобільних роботів для моніторингу рейкових кіл. Визначено деякі можливі напрямки розробки мобільних роботів для моніторингу параметрів рейкових кіл. Обладнання мобільного робота котушками АЛСН, супутниковою навігацією, радіозв'язком та пристроями автомашиніста забезпечить безпеку руху під час тестових поїздок по перегону. Застосування зазначених пристроїв і технологій легко реалізується шляхом використання відповідних систем аналогічно до існуючих на залізничному транспорті. Вимірювальна частина складається з пристроїв накопичення і запису сигналів рейкових кіл з одночасним записом положення системи на перегоні за сигналами від супутникової навігаційної системи, колісних датчиків та корегування результатів при проходженні границь блок-дільниць.

Аналіз кодових параметрів сигнального струму дозволяє визначити сталі тенденції в їх зміні і, відповідно, передбачити виникнення збоїв. Контроль виконання шунтового режиму може бути реалізовано з застосуванням першої осі робота-платформи з нормативним електричним опором. Вимірювання диференційного струму і загального зворотного тягового струму в рейках дозволяє контролювати його спектральний склад, а також коефіцієнт асиметрії тягового струму в рейках. Зміни загального і диференційного струму в рейках при проходженні ізолюючих стиків дають інформацію про їх технічний стан. Використання високочутливих сенсорів дозволить контролювати сигнальний струм в тональних рейкових колах.

Використання роботів для контролю залізничної інфраструктури дає значні переваги з точки зору безпеки, ефективності та якості даних. Подолання проблем, пов'язаних з їх впровадженням, вимагатиме постійних інновацій і співробітництва між постачальниками технологій і залізничними операторами.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Rahman M., Liu H., Cardenas I. D., Starr A., Hall A., Anderson R. // A review on the prospects of mobile manipulators for smart maintenance of railway track. *Applied Sciences*, - 2023, - 13(11), - 6484.
2. Kumar A., Harsha S. P. A systematic literature review of defect detection in railways using machine vision-based inspection methods // *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2024.
3. Bhushan M., Sujay S., Tushar B., Chitra P. Automated vehicle for railway track fault detection // *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, Vol. 263, No. 5, P. 052045.
4. AutoScan – Rail inspection by autonomous systems [Електронний ресурс]. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/720506/it>.
5. Trivedi M.M., Ng K.C., Lassiter N., Capella R. New Generation of Multirobot Systems // *In Proceedings of the SMC'98 Conference Proceedings, 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No.98CH36218)*, San Diego, CA, USA, 1998; - Vol. 4, - P. 3342–3346.
6. Ranganathan P., Olson E. Automated Safety Inspection of Grade Crossings // *In Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Taipei, Taiwan, 2010, - P. 2149–2154.
7. Santur Y., Karakose M., Akin E. A New Rail Inspection Method Based on Deep Learning Using Laser Cameras // *In Proceedings of the 2017 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, Malatya, Turkey, 2017, - P. 1–6.
8. Mobile Robotic Inspection for Railway Infrastructures. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.loccioni.com/en/railway>.
9. Innovation & Technology. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.voestalpine.com/blog/en/innovation-technology>.
10. Robotic inspection for rail transport. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.anybotics.com/industries/robotic-inspection-railway-transportation>.
11. Webinar. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.dvmedia-webinar.com>.
12. Havryliuk V. ANFIS Based Detecting of Signal Disturbances in Audio Frequency Track Circuits, - 2020 IEEE 2nd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), Kyiv, Ukraine, - 2020, - P. 1–6.
13. ЦШ/0042. Пристрої сигналізації, централізації та блокування. Технологія обслуговування, затверджена наказом Державної адміністрації залізничного транспорту України від 26.04.2006 № 347-ЦЗ.
14. Havryliuk V. Sensitivity of the model of traction current distribution in rails to variability in impedances and admittances of the rail network // *Internat. Symp. EMC Europe, Brugge, Belgium*, - 2024, - P. 362–367

Надійшла в редколегію 10.12.2025

Прийнята до друку 16.02.2025

PROSPECTS FOR USING ROBOTS TO MONITOR THE TECHNICAL CONDITION OF TRACK CIRCUITS

Purpose. The purpose of the work is to conduct an analytical review of publications on the use of robots for inspecting railway infrastructure facilities, consider the problems and prospects for the development of robotic complexes on railways, and formulate possible directions for the development of mobile robots for monitoring the parameters of rail circuits. **Methods.** Measurement and analysis of the parameters of the signal current of rail circuits, automatic locomotive signaling, reverse traction current in rails for timely detection of failures in the operation of rail circuits. **Results.** Some possible directions for the development of mobile robots for monitoring the parameters of rail circuits have been identified. Equipping a mobile robot with ALSN coils, satellite navigation, radio communication, and driver devices will ensure traffic safety during test trips along the route. The use of these devices and technologies is easily implemented by using the appropriate systems similar to those existing in railway transport. The measuring part consists of devices for accumulating and recording signals of rail circuits with simultaneous recording of the system position on the stretch according to signals from the satellite navigation system, wheel sensors and correction of results when passing the boundaries of block sections. Analysis of the code parameters of the signal current allows to determine stable trends in their change and, accordingly, to predict the occurrence of failures. Control of the execution of the shunt mode can be implemented using the first axis of the robot platform with a standard electrical resistance. Measurement of the differential current and the total reverse traction current in the rails allows to control its spectral composition, as well as the asymmetry coefficient of the traction current in the rails. Changes in the total and differential current in the rails when passing insulating joints provide information about their technical condition. The mobile robot can perform additional measurements on insulating joints when stopping. The use of highly sensitive sensors will allow to control the signal current in tone rail circuits. **Practical significance.** The results obtained can be used in the development of a system of continuous monitoring of rail circuits, which will allow to increase the safety of train traffic and reduce operating costs. The proposed method allows not only to detect faults in rail circuits, but also to predict their condition, which will allow to plan maintenance more effectively and reduce the risks of failures in their operation.

Keywords: robots, monitoring of the technical conditions, track circuits, parameters' monitoring