

УДК 656.25

В. І. ГАВРИЛЮК^{1*}, С. О. ШЕМАНОВ^{2*}

^{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

^{2*} Студент, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, г. Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта shemanov@gmail.com.

ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ РУХУ ПОЇЗДІВ ШЛЯХОМ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛЬНОГО СТРУМУ В РЕЙКОВИХ КОЛАХ

Мета. Безпека руху поїздів значною мірою залежить від функційної безпечності і надійності роботи засобів залізничної автоматики та зв'язку. При цьому особлива роль у цьому належить системі інтервального регулювання руху поїздів, до складу якої входить автоблокування, автоматична локомотивна сигналізація (АЛС), системи контролю пильності машиніста, автостопа. Однією з основних проблем поточного підходу до моніторингу рейкових кіл є використання ручних вимірювань, які є дорогими, трудомісткими та схильними до людських помилок. Крім того, ці ручні процеси часто не забезпечують необхідної точності для виявлення дефектів на ранній стадії. Для заповнення цієї прогалини необхідний безперервний автоматичний моніторинг сигнального струму в рейкових колах, що дозволяє своєчасно виявляти критичні спотворення сигналу і надлишкові електромагнітні завади в рейкових колах, які можуть спричинити збої в їх роботі. Метою дослідження є підвищення безпеки руху поїздів шляхом автоматичного контролю параметрів сигнального струму в рейкових колах. Для досягнення цієї мети необхідно визначити характерні ознаки сигнального струму в РК, які можуть бути використані для своєчасного і надійного виявлення в ньому дефектів та надлишкових завод, що можуть привести до збоїв у роботі систем управління рухом поїздів.

Методи. Аналіз сигнального струму рейкового кола в часовій області з шляхом знаходження огинаючої сигналу розрахунком середньоквадратичного значення напруги в імпульсі і паузі сигналу, а також спектральний аналіз сигналу методом перетворення Фур'є.

Результати. Визначено, що аналіз рівнів напруги на вході колійного приймача під час імпульсів і пауз сигнального струму може надати додаткову інформацію про потенційні дефекти РК, які можуть бути неочевидними лише за допомогою простих вимірювань напруги на рейковому приймачі.

Хоча аналіз середньоквадратичної напруги сигналів у рейкових колах надає цінну діагностичну інформацію, тільки її може бути недостатньо. Відстежуючи рівні напруги, зокрема в імпульсах і паузах сигнального струму, і доповнюючи це спектральним аналізом, можна отримати набагато більш детальне розуміння стану рейкового кола. Спектральний аналіз, зокрема, дозволяє виявити порушення, які можуть бути неочевидними при аналізі в часовій області, але все ж вказують на потенційні несправності. Запропоновано спектральний аналіз сигнального струму в рейках необхідно виконувати окремо для імпульсів і пауз, подібно до аналізу в часовій області. Однак через невелику тривалість імпульсів і пауз (приблизно 0,083 секунди) важко виконати спектральний аналіз з необхідною точністю через фундаментальний принцип невизначеності. Спектральний аналіз займає більше часу та потребує більше обчислень, ніж аналіз у часовій області. У результаті рекомендується двоетапний процес діагностики. На першому етапі слід виконати більш простий аналіз сигнального струму у часовій області, щоб швидко визначити будь-які ознаки над-мірних завод. У разі виявлення будь-яких аномалій можна провести більш детальний частотно-часовий аналіз як другий крок, щоб підтвердити природу спотворень сигналу та оцінити його вплив на працездатність рейкового кола. Завдяки безперервному моніторингу сигналів в НК з їх аналізом у часовій і частотній областях можна не тільки виявляти несправності, але й прогнозувати їх до їх виникнення, що дозволяє більш ефективно планувати технічне обслуговування та знижує ризики збоїв у роботі.

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 до їх виникнення, що дозволяє більш ефективно планувати технічне обслуговування та знижує ризики збоїв у роботі.

Ключові слова: безпека руху поїздів; моніторинг технічного стану; рейкові кола; аналіз в часовій області; спектральний аналіз.

Вступ

Безпека руху поїздів значною мірою залежить від функційної безпечності і надійності роботи засобів залізничної автоматики та зв'язку. При цьому особлива роль у цьому належить системі інтервального регулювання руху поїздів, до складу якої входить автоблокування, автоматична локомотивна сигналізація (АЛС), системи контролю пильності машиніста, автостопа. Основним датчиком положення поїзду, а також каналом передачі сигналів АЛС в кабіну машиністу є рейкові кола (РК), принцип роботи яких базується на передачі сигнального струму від генератора, що знаходиться на живлячому кінці РК, до колійного приймача, що знаходиться на протилежному кінці РК. На функціонування рейкових кіл впливає багато факторів різної природи, в тому числі нестабільність провідності між рейками і землею внаслідок забруднення баласту, зміни метеорологічних обставин, а також зміна опору рейкових з'єднувачів, знос і старіння елементів і апаратури РК, електромагнітні завади та інше [1].

Однією з основних проблем поточного підходу до моніторингу рейкових кіл є використання ручних вимірювань, які є дорогими, трудомісткими та схильними до людських помилок. Крім того, ці ручні процеси часто не забезпечують необхідної точності для виявлення дефектів на ранній стадії. Для заповнення цієї прогалини необхідний безперервний автоматичний моніторинг сигнального струму в рейкових колах, що дозволяє своєчасно виявляти критичні спотворення сигналу і надлишкові електромагнітні завади в рейкових колах, які можуть спричинити збої в їх роботі [2][3].

Постановка завдання дослідження

Для забезпечення безпечної і безвідмовної роботи рейкових кіл напруга на їх компонентах, а також сигнальний струм в рейках має періодично контролюватися обслуговуючим персоналом шляхом прямих вимірювань у рейках та/або під час планових випробувальних поїздок спеціально обладнаного вагона-лабораторії, який записує в комп'ютер часову залежність сигнального струму з прив'язкою до координати поїзду [4], [5].

Записаний сигнал візуально аналізується електромеханіком для виявлення проблемних ділянок, де параметри сигналу суттєво відрізняються від нормативних. Ця технологія обробки сигналу є малоєфективною і не забезпечує необхідної точності.

Мета дослідження

Метою дослідження є підвищення безпеки руху поїздів шляхом автоматичного контролю параметрів сигнального струму в рейкових колах. Для досягнення цієї мети необхідно визначити характерні ознаки сигнального струму в РК, які можуть бути використані для своєчасного і надійного виявлення в ньому дефектів та надлишкових завад, що можуть привести до збоїв у роботі систем управління рухом поїздів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для виявлення проблемних сегментів сигнального струму в рейкових колах зазвичай використовується перетворення Фур'є (ПФ), але реальний сигнальний струм не є стаціонарним, містить значну випадкову інтерференцію, і тому ПФ не забезпечує правильну оцінку спектрального струму [6], [7].

Денніс Габор запропонував короткочасне перетворення Фур'є для спектрального аналізу нестационарних сигналів, але його використання має деякі обмеження. Зокрема, одне з них пов'язане з протиріччям між довжиною віконної функції і шириною смуги частот, що залежить від довжини віконної функції [8], [9].

В останні десятиліття теорія вейвлетів стала потужним інструментом обробки сигналів, який широко використовується для аналізу нестационарних сигналів у багатьох практичних застосуваннях [8], [9]. Вейвлет-перетворення (ВП) дозволяє нам одночасно аналізувати характеристики сигналу як у часовій, так і в частотній областях, але на відміну від ПФ, вейвлет-аналіз використовує інше часове вікно, довжина якого залежить від частоти, що аналізується.

Для автоматизації виявлення спотворень сигнального струму і завад в його складі необхідно провадити його аналіз як у часовій, так і у частотній області.

Вибір структури і параметрів пристрою для моніторингу сигнального струму

Апаратно-програмний комплекс для моніторингу сигнального струму в рейках складається, у загальному вигляді, з первинного безконтактного перетворювача тягового струму у напругу (П), пристрою узгодження (УП), аналогового антиаліасінгового фільтру (АФ), аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) і програмно-апаратного комплексу (комп'ютеру), який виконує перетворення Фур'є з представленням спектру (рис. 1).

В якості первинного перетворювача струму може використовуватися котушка Роговського або датчик струму на основі ефекту Холла. Для вимірювання у вагон-лабораторії або на локомотиві в якості датчиків струму в рейках можна взяти котушки АЛСН. Частота зрізу антиаліасінгового фільтру вибирається з урахуванням частоти Найквіста.

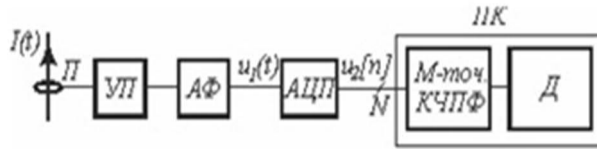


Рис. 1. Структурна схема АПК для спектрального аналізу тягового струму

Визначення характерних діагностичних ознаки сигнального струму

Для забезпечення надійної роботи РК основні параметри сигнального струму, такі як тривалість імпульсів і пауз, а також середньоквадратичні значення сигналів в імпульсах і паузах, повинні відповідати певним нормативним вимогам. Для визначення цих параметрів на апаратно-програмному вимірювальному комплексі необхідно перетворити сигнальний струм так само, як при його демодуляції у рейковому приймачі, тобто знайти огинаючу сигналу шляхом усунення коливаний несучої частоти. Для цього в роботі використано метод заснований на знаходженні середньоквадратичного значення (СКЗ) сигналу в певних інтервалах.

Часові залежності напруги на вході рейкового приймача для двох сегментів сигнального струму відповідно з малими та значними спотвореннями наведено на рис. 2.

Для ілюстрації застосування методу СКЗ на рис. 3 показані сигнали з незначними спотвореннями (а) і зі значними спотвореннями (б), що відповідають показаним на рис. 4, а також їх огинаючі, отримані методом СКЗ. Ці огинаючі показані разом із двома пороговими рівнями напруги на вході приймача рейкового кола. Для надійної роботи рейкового кола сигнал під час імпульсів не повинен опускатися нижче верхнього рівня напруги (ВН), а під час пауз не повинен перевищувати нижнього рівня (НН) більше ніж на 0,3 секунди.

Як видно з рис. 5, для сигналу з незначними спотвореннями ці умови виконуються. Однак для сигналу зі значними спотвореннями огинаюча сигналу в деякі моменти часу перевищує допустимі рівні. Це має класифікуватися системою діагностики як нестабільна робота РК.

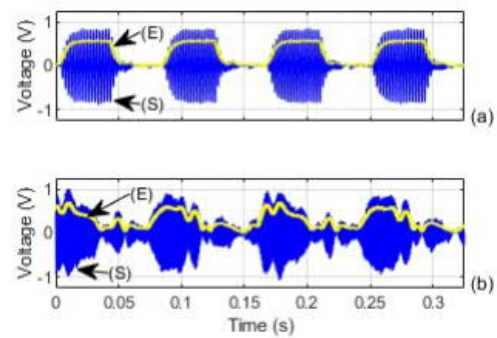


Рис. 2. Часові залежності напруги сигналу (позначаються літерою S) та їх огинаючої (позначаються літерою E) на вході приймача РК для сигналів малими (а) та значними (б) спотвореннями

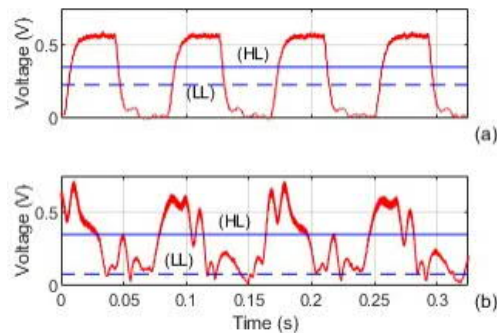


Рис. 3. Огинаючі сигналу та два порогові рівні для сигналу АСК: верхній рівень (HL) відповідає мінімальній межі напруги в імпульсах, а нижній рівень (LL) відповідає максимальній межі напруги в паузах АСК сигнал

Спектральний аналіз цих сигналів

Спектральний аналіз сигналів проводили з вікном Ханна довжиною 1 с. Спектри цих сигналів наведені на рис. 4.

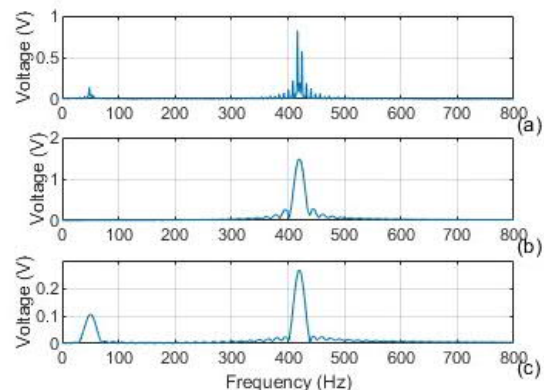


Рис. 4. Спектри сигналу із завадами визначені для інтервалу 1 с (а), для імпульсу сигналу (б), для паузи сигналу (в).

У спектрах виявлено піки поблизу несучої частоти сигналу 420 Гц, а також піки на частоті тягового струму 50 Гц. Незважаючи на суттєві відмінності між формами хвиль у часовій області цих фрагментів сигналу, їхні спектри не

демонструють ознак, які б допомогли ідентифікувати надмірні спотворення сигналу. Це пов'язано з усередненням нестационарних характеристик сигналу за всі інтервали часу, обрані для аналізу (в даному випадку 1 с).

Відповідно, спектральний аналіз сигнального струму в рейках необхідно виконувати окремо для імпульсів і пауз, подібно до аналізу в часовій області. Однак через невелику тривалість імпульсів і пауз (приблизно 0,083 секунди) важко виконати спектральний аналіз з необхідною точністю через фундаментальний принцип невизначеності.

Висновки

В роботі з метою підвищення безпеки руху поїздів шляхом автоматичного контролю параметрів сигнального струму в рейкових колах проведено вибір структурної схеми і параметрів комплексу для вимірювання сигнального струму в рейках і визначено характерні ознаки сигнального струму, які можуть бути використані для своєчасного і надійного виявлення дефектів та надлишкових завад в рейкових колах.

Визначено, що аналіз рівнів напруги на вході колійного приймача під час імпульсів і пауз сигнального струму може надати додаткову інформацію про потенційні дефекти РК, які можуть бути неочевидними лише за допомогою простих вимірювань напруги на рейковому приймачі.

Хоча аналіз середньоквадратичної напруги сигналів у рейкових колах надає цінну діагностичну інформацію, тільки її може бути недостатньо. Відстежуючи рівні напруги, зокрема в імпульсах і паузах сигнального струму, і доповнюючи це спектральним аналізом, можна отримати набагато більш детальне розуміння стану рейкового кола. Спектральний аналіз, зокрема, дозволяє виявити порушення, які можуть бути неочевидними при аналізі в часовій області, але все ж вказують на потенційні несправності.

Однак спектральний аналіз займає більше часу та потребує більше обчислень, ніж аналіз у часовій області. У результаті рекомендується двоетапний процес діагностики. На першому етапі слід виконати більш простий аналіз сигнального струму у часовій області, щоб швидко визначити будь-які ознаки надмірних завад. У разі виявлення будь-яких аномалій можна провести більш детальний частотно-часовий аналіз як другий крок, щоб підтвердити природу спотворень сигналу та оцінити його вплив на працездатність рейкового кола. Завдяки безперервному моніторингу сигналів в НК з їх аналізом у

часовій і частотній областях можна не тільки виявляти несправності, але й прогнозувати їх до їх виникнення, що дозволяє більш ефективно планувати технічне обслуговування та знижує ризики збоїв у роботі.

БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бойнік, А.Б. Системи інтервального регулювання руху потягів на перегонах: навчальний посібник / А.Б. Бойнік, С. В. Кошовий, С. В. Панченко. – Харків: УКРГАЖТ, 2005. – 256 с.
2. Кулик, П. Д. "Тональные рельсовые цепи в системах ЖАТ: построение, регулировка, обслуживание, поиск и устранение неисправностей, повышение эксплуатационной надежности: монография / Н. С. Ивакин, А. А. Удовиков. – Київ: Изд. дом «Мануфактура», – 2004. – 156 с.
3. Гололобова О.О. Аналіз статистики відмов та збоїв у роботі автоматичної локомотивної сигналізації/ О.О. Гололобова, С.Ю. Буряк, В.І Гаврилюк, Р.В. Маркуль // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – Д.: ДНУЗТ, 2019. – Вип. 18. – С. 11-19.
4. Oksana Hololobova, Serhii Buriak, Volodymyr Havryliuk, Ihor Skovron, & Oleksii Nazarov (2019). Mathematical modelling of the communication channel between the rail circuit and the inputs devices of automatic locomotive signalization. MATEC Web of Conferences Volume 294 (2019) 2nd International Scientific and Practical Conference "Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport" (EOT-2019). Retrieved https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2019/43/mateconf_eot18_03009.pdf.
5. Гаврилюк В. І. Рациональний вибір параметрів апаратно-програмного комплексу для спектрального аналізу тягового струму / В. І. Гаврилюк, В. В. Мелешко // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2019. – №. 17. – С. 20-29.
6. Havryliuk V. Choice of STFT and WT Parameters for Monitoring of EMI in Track Circuits // 2023 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – EMC Europe, Krakow, Poland. – 2023. – P. 1-4.
7. Havryliuk V. Choice of the Parameters of an EMI Monitoring System for an AC Traction Network // IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications. – Vol. 5. – No. 3. – P. 77-81.
8. Smith S. Digital signal processing: a practical guide for engineers and scientists. – Elsevier, 2013. – 311 p.
9. Гаврилюк В. І. Вибір параметрів перетворення Фур'є для спектрального аналізу тягового струму // В. І. Гаврилюк, В. В. Мелешко // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2019. – №. 17. – С. 11-19.

Надійшла в редколегію 01.08.2024.

Прийнята до друку 29.08.2024.

IMPROVING TRAIN MOVEMENT SAFETY BY USING AUTOMATIC CONTROL OF SIGNAL CURRENT PARAMETERS IN TRACK CIRCUITS

Purpose. The safety of train traffic largely depends on the functional safety and reliability of railway automation and communication. At the same time, a special role in this belongs to the system of interval regulation of train traffic, which includes autoblocking, automatic locomotive signaling (ALS), driver alertness control systems, hitchhikers. One of the main problems with the current approach to rail lap monitoring is the use of manual measurements, which are expensive, time-consuming and prone to human error. In addition, these manual processes often do not provide the necessary accuracy to detect defects at an early stage. To fill this gap, continuous automatic monitoring of the signal current in the rail wheels is necessary, which allows for timely detection of critical signal distortions and excess electromagnetic interference in the rail wheels, which can cause malfunctions in their operation. The purpose of the research is to improve the safety of train traffic through automatic control signal current parameters in rail circuits. To achieve this goal, it is necessary to determine the characteristic features of the signal current in the RC, which can be used for timely and reliable detection of defects and excess interference in it, which can lead to failures in the operation of train traffic control systems. **Results.** It was determined that the analysis of voltage levels at the input of the track receiver during pulses and pauses of the signal current can provide additional information about potential defects of the LCD, which may not be obvious only with the help of simple voltage measurements on the rail receiver. Although the analysis of the rms voltage of signals in rail circuits provides valuable diagnostic information, it alone may not be enough. By monitoring the voltage levels, in particular in pulses and pauses of the signal current, and supplementing it with spectral analysis, you can get a much more detailed understanding of the state of the rail circuit. Spectral analysis, in particular, allows you to detect disturbances that may not be obvious when analyzing in the time domain, but still indicate potential malfunctions. It is proposed that the spectral analysis of the signal current in the rails should be performed separately for pulses and pauses, similar to the analysis in the time domain. However, due to the short duration of the pulses and pauses (approximately 0.083 seconds), it is difficult to perform spectral analysis with the required accuracy due to the fundamental uncertainty principle. Spectral analysis is more time-consuming and computationally intensive than time-domain analysis. As a result, a two-stage diagnostic process is recommended. At the first stage, a simpler analysis of the signal current in the time domain should be performed to quickly identify any signs of excessive interference. If any anomalies are detected, a more detailed time-frequency analysis can be performed as a second step to confirm the nature of the signal distortion and assess its impact on the rail circuit performance. Thanks to the continuous monitoring of signals in the HC with their analysis in the time and frequency domains, it is possible not only to detect malfunctions, but also to predict them before they occur, which allows for more effective maintenance planning and reduces the risks of malfunctions. **Practical significance.** The obtained results can be used in the development of a system of continuous monitoring of rail circles, which will increase the safety of train traffic and reduce operational costs. The proposed method allows not only to detect malfunctions in rail wheels, but also to predict them before they occur, which allows for more effective maintenance planning and reduces the risk of malfunctions.

Key words: train traffic safety; technical condition monitoring; rail wheels; analysis in the time domain; spectral analysis.