

## АНОТАЦІЯ

*Серченко М. С.* Підвищення завадостійкості рейкових кіл залізничної автоматики шляхом впровадження фільтрів з нанокристалічним осердям. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 273 – Залізничний транспорт. – Український державний університет науки і технологій, Дніпро, 2026.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної науково-прикладної задачі – підвищенню завадостійкості рейкових кіл залізничної автоматики, що працюють в умовах інтенсивних електромагнітних завад від системи тягового електропостачання постійного струму. В якості основного технічного рішення запропоновано впровадження фільтрів з нанокристалічним осердям, які завдяки унікальним магнітним властивостям забезпечують ефективне придушення гармонічних складових зворотного тягового струму, зокрема на частотах 300, 600, 900 Гц та вище, що є критичними для надійної роботи рейкових кіл.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю забезпечення надійної та безпечної роботи пристроїв залізничної автоматики в умовах зростання потужності тягових навантажень, ускладнення структури електропостачання та впровадження сучасних електронних і цифрових засобів керування рухом поїздів.

На сьогодні питанням перспектив розвитку української залізниці присвячені наукові праці багатьох вітчизняних учених. Зокрема, значний внесок у дослідження проблем розвитку залізничного транспорту зробили Соболев Ю.В., Разгонов А. П., Гаврилюк В.І., Сердюк Т.М., Бойнік А.Б., Мірошник Р. О., Бараш Ю. С., Кердан О. С., Кердан В. Ю., Корінь М. В., Овчиннікова В. О., Редько В. Є., Рекун І. І., Токманова І. В., Чаркіна Т. Ю., Чудомєх І. О., Папайка Ю. А. та інші науковці, у роботах яких розглядаються стратегічні, організаційні та техніко-економічні аспекти розвитку залізничного транспорту України.

Вагомий внесок у розвиток наукових досліджень у галузі електромагнітної сумісності, а також у підвищення завадостійкості пристроїв залізничної автоматики, зробили Гаврилюк В. І., Сердюк Т. М., Щека В.І., Ящук К.І., Журавлев А.Ю, Романцев І. О., Думанський Ю. Д., Панасенко М. В., Сиченко В. Г., Босий Д. О., Муха А. М., Леонов С. Ю., Іванов В. О., Габрусенко Є. І., Ільницький Л. Я., Щербіна О. А., Головін Ю. О., Шолохов С. М., Самборський І. І., Яндутьський О. С. У працях зазначених авторів досліджено механізми виникнення електромагнітних завад, особливості їх впливу на пристрої залізничної автоматики та запропоновано методи підвищення завадостійкості інформаційних і керувальних систем.

Суттєвий внесок у вивчення проблем електромагнітної сумісності та аналізу електромагнітних завад у складних технічних системах зробили також зарубіжні науковці, зокрема Чанкай Ся, Франк Леферінк, П'єтро Тріколі, Дви Мандарис, Андреа Марісокотті, Леонардо Сардоліні, Давид Томас, Мауро Фелізіані, Умберто Паулетті, Клейтон Пол, Генрі В. Отт, Флавіо Канаверо, Кейзер Кенет, Четан Каталай, Вільямс Т. У їхніх працях розглядаються теоретичні та прикладні аспекти забезпечення електромагнітної сумісності системи силової електроніки, тягового електропостачання залізничного транспорту із суміжними пристроями, методи аналізу та зниження електромагнітних завад, а також питання підвищення надійності функціонування електронних і електротехнічних систем.

У першому розділі виконано ґрунтовний аналіз сучасного стану проблеми електромагнітної сумісності на залізничному транспорті. Визначено основні джерела ЕМЗ: тягові перетворювачі з ШІМ, комутаційна апаратура, випрямлячі, а також зовнішні впливи. Показано, що найбільш вразливими елементами є саме рейкові кола (особливо тональні та кодові), оскільки вони використовують рейкову лінію як спільний провідник для сигнального та тягового струмів. Проаналізовано існуючі методи захисту (фільтри, екранування, заземлення) та виявлено їхні обмеження: низька ефективність на

високих частотах, схильність до насичення сталевих осердь, великі габарити. Обґрунтовано необхідність переходу на нові матеріали та методи діагностики.

У другому розділі удосконалено математичну модель електромагнітної взаємодії між системою тягового електропостачання та рейковими колами. На відміну від існуючих, модель представлена як дванадцятиполюсник, що враховує електромагнітний зв'язок між контактною мережею, двома рейковими нитками, високовольтними лініями СЦБ та ПЕ 6(10) кВ, а також землею. Виконано редукцію до двоконтурної системи «тяговий контур – сигнальний контур». Отримано чисельні значення коефіцієнтів поширення хвиль, розподіл наведеної напруги вздовж лінії, частотні залежності імпедансів. Проведено оцінку адекватності моделі за критеріями Фішера та Стьюдента.

У третьому розділі представлено результати експериментальних досліджень гармонійного складу зворотного тягового струму в рейкових колах. Розроблено та апробовано два методи моніторингу: стаціонарний (на посту електричної централізації) та динамічний (під час руху поїзда). Вперше застосовано метод одночасного вимірювання сигналів у чотирьох суміжних тональних РК метрополітену при в'їзді, русі та розгоні поїзда. Виявлено, що в нормальному режимі переважають канонічні гармоніки (100, 150, 200, 250, 300 Гц) від випрямлячів, а під час руху поїзда з'являються додаткові гармоніки 150 Гц та 300 Гц, зумовлені роботою тягових двигунів. Для задач залізничної автоматики запропоновано метод класифікації електромагнітних завад у рейкових колах з використанням машинного навчання. Реалізовано паралельне застосування двох моделей: алгоритмів згорткової нейронної мережі (1D CNN) для аналізу сирих часових рядів та класифікатора Random Forest (RF), що працює на основі 15 вручну сконструйованих ознак у часовій та частотній областях. Для навчання згенеровано синтетичний набір даних (3000 реалізацій), що включає чисті сигнали та сигнали з типовими завадами (гармонічні, імпульсні, вузькосмугові, шум). Проведено калібрування моделей (температурне масштабування для CNN та Platt-масштабування для RF), що

дозволило отримати реалістичні ймовірнісні оцінки. На тестовій вибірці обидві моделі досягли  $AUC > 0,99$ , причому CNN показала дещо кращі результати для імпульсних та вузькосмугових завад.

У четвертому розділі виконано основне завдання роботи – обґрунтовано та розроблено засоби забезпечення завадостійкості РК: фільтри із нанокристалічними осердями. Наведено математичний апарат для розрахунку параметрів тороїдальних котушок із нанокристалічним осердям. Експериментально досліджено частотні характеристики розроблених котушок у діапазоні від 500 Гц до 200 кГц: підтверджено стабільне зростання імпедансу та кута фазового зсуву, що свідчить про високу ефективність придушення ЕМЗ. Виконано порівняльний аналіз з існуючим блок-фільтром ЗБФ-1. Розраховано економічний ефект від впровадження засобів забезпечення завадостійкості кодових та тональних РК: фільтрів із нанокристалічним осердям.

Метою дисертаційної роботи є підвищення завадостійкості рейкових кіл залізничної автоматики шляхом впровадження фільтрів з нанокристалічним осердям на основі удосконалення математичних моделей електромагнітної взаємодії, аналізу впливу тягових струмів і їх гармонічних складових, а також розроблення методів і технічних рішень щодо контролю і зменшення рівня електромагнітних завад.

Для досягнення поставленої мети в роботі було поставлено задачі які необхідно вирішити:

- проаналізувати сучасний стан проблеми електромагнітної сумісності на залізничному транспорті, дослідити джерела і шляхи поширення електромагнітних завад у системах тягового електропостачання та залізничної автоматики;
- удосконалити математичну модель системи тягового електропостачання із пристроями залізничної автоматики за рахунок збільшення компонентів системи, визначити їх електромагнітну взаємодію;

- провести експериментальні та теоретичні дослідження електромагнітних процесів в рейкових колах, обґрунтувати новий метод дослідження електромагнітних завад з використанням машинного навчання;
- дослідити можливість впровадження сучасних засобів пригнічення електромагнітних завад в системах залізничної автоматики шляхом використання фільтрів із нанокристалічними осердям.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в:

- удосконалено математичну модель електромагнітної взаємодії між системою тягового електропостачання та рейковими колами, яка представлена дванадцятиполюсником і відрізняється від існуючих тим, що враховує електромагнітний зв'язок між контактною мережею, рейковими нитками, лініями ВЛ СЦБ, ВЛ ПЕ 6 (10) кВ та землею;
- вперше розроблено алгоритми і методи оцінювання параметрів кодових струмів та електромагнітних завад за рахунок вимірів у контрольних точках на посту електричної централізації одночасно в чотирьох рейкових колах, що дає можливість оцінювати роботу систем залізничної автоматики без перерви в русі поїзда і перейти у подальшому від планово-попереджувального технічного обслуговування рейкових кіл до обслуговування «за станом» об'єкту;
- вперше розроблено метод класифікації електромагнітних завад на основі машинного навчання із алгоритмами паралельного застосування згорткової нейронної мережі CNN та класифікатора Random Forest;
- вперше запропоновано шляхи підвищення завадостійкості в кодових та тональних рейкових колах за рахунок використання фільтрів із нанокристалічним осердям, що сприяє покращенню електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання з пристроями залізничної автоматики, зменшенню масо-габаритних показників пристроїв залізничної автоматики завдяки характеристикам нанокристалічних матеріалів.

Практичне значення отриманих результатів науково-дослідної роботи полягає у їх використанні під час навчання в дисциплінах «Електроживлення

систем автоматики та зв'язку» і «Електромагнітна сумісність систем автоматики», що підтверджуються відповідним актом про впровадження.

Здобуті в дисертації наукові результати дозволили розробити методи із використанням сучасних вимірювальних засобів автоматизованого вимірювання параметрів кодового струму і рівнів та спектру електромагнітних завад на посту електричної централізації, що підтверджуються відповідним актом про впровадження.

Розроблено алгоритми та програмне забезпечення для реалізації автоматизованого контролю електромагнітних завад в рейкових колах шляхом використання машинного навчання. Створені ефективні методи оцінки електромагнітних завад можуть бути використані при проектуванні, модернізації та експлуатації систем тягового електропостачання і пристроїв залізничної автоматики.

Наукові дослідження виконано у відповідності із стратегією інтеграції Укрзалізниці та Молдови в Європейський Союз (ЄС), Планом створення смуг солідарності із між ЄС та Україною, Концепції розвитку Укрзалізниці до 2030 р. Запропоновані підходи та моделі можуть бути використані для оцінки електромагнітної обстановки на електрифікованих ділянках залізниць та обґрунтування заходів щодо забезпечення електромагнітної сумісності.

**Ключові слова:** електромагнітна сумісність, електромагнітні завади, тяговий струм, рейкові кола, двигун, напруга, струм, спектр, моделювання, коефіцієнт магнітного насичення, залізнична автоматика, випрямляч, електропоїзд, залізничний транспорт.

## ABSTRACT

Serchenko M. S. Improving the noise immunity of railway automation rail circuits by introducing filters with nanocrystalline cores. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 273 – Railway Transport. – Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, 2026.

The dissertation is devoted to solving a pressing scientific and applied problem – increasing the noise immunity of railway automation rail circuits operating under intense electromagnetic interference from the DC traction power supply system. As the main technical solution, the introduction of filters with nanocrystalline cores is proposed, which, due to their unique magnetic properties, ensure effective suppression of harmonic components of the reverse traction current, in particular at frequencies of 300, 600, 900 Hz and above, which are critical for the reliable operation of rail circuits.

The relevance of the work is determined by the need to ensure reliable and safe operation of railway automation devices in conditions of increasing traction load power, the growing complexity of the power supply structure, and the introduction of modern electronic and digital train control systems.

To date, the prospects for the development of Ukrainian railways have been the subject of scientific works by many domestic scientists. In particular, a significant contribution to the study of railway transport development problems has been made by Sobolev Yu.V., Razghonov A.P., Havryliuk V.I., Serdiuk T.M., Boinik A.B., Miroshnyk R.O., Barash Yu.S., Kerdan O.S., Kerdan V.Yu., Korin M.V., Ovchynnikova V.O., Redko V.Ye., Rekun I.I., Tokmanova I.V., Charkina T.Yu., Chudomekh I.O., Papaika Yu.A. and other researchers, whose works address strategic, organizational, and technical-economic aspects of the development of railway transport in Ukraine.

A significant contribution to the development of scientific research in the field of electromagnetic compatibility, as well as to increasing the noise immunity of railway automation devices, has been made by Havryliuk V.I., Serdiuk T.M.,

Shcheka V.I., Yashchuk K.I., Zhuravlev A.Yu., Romantsev I.O., Dumanskyi Yu.D., Panasenko M.V., Sychenko V.H., Bosyi D.O., Mukha A.M., Leonov S.Yu., Ivanov V.O., Habrusenko Ye.I., Ilnytskyi L.Ya., Shcherbina O.A., Holovin Yu.O., Sholokhov S.M., Samborskyi I.I., Yandulskyi O.S. The works of these authors investigate the mechanisms of electromagnetic interference generation, the specifics of their impact on railway automation devices, and propose methods for increasing the noise immunity of information and control systems.

A substantial contribution to the study of electromagnetic compatibility problems and the analysis of electromagnetic interference in complex technical systems has also been made by foreign scientists, including C. Xia, F. Leferink, P. Tricoli, D. Mandaris, A. Mariscotti, L. Sandrolini, D. Thomas, M. Feliziani, U. Paoletti, C. Paul, H.W. Ott, F. Canavero, K. Keenan, C. Katalay, and T. Williams. Their works examine theoretical and applied aspects of ensuring electromagnetic compatibility between power electronics systems, railway traction power supply, and adjacent devices, methods for analyzing and reducing electromagnetic interference, as well as issues of improving the reliability of electronic and electrical systems.

The first chapter provides a thorough analysis of the current state of the electromagnetic compatibility problem in railway transport. The main sources of electromagnetic interference are identified: traction converters with PWM, switching equipment, rectifiers, as well as external influences. It is shown that the most vulnerable elements are precisely rail circuits (especially audio frequency and coded ones), as they use the rail line as a common conductor for signal and traction currents. Existing protection methods (filters, shielding, grounding) are analyzed, and their limitations are revealed: low efficiency at high frequencies, susceptibility to saturation of steel cores, and large dimensions. The necessity of transitioning to new materials and diagnostic methods is substantiated.

The second chapter improves the mathematical model of electromagnetic interaction between the traction power supply system and rail circuits. Unlike existing models, the model is presented as a twelve-terminal network that takes into

account the electromagnetic coupling between the contact network, two rail threads, high-voltage signaling and communication lines (VL SCB), and 6(10) kV power lines (VL PE), as well as the ground. A reduction to a two-loop system “traction loop – signal loop” is performed. Numerical values of wave propagation coefficients, the distribution of induced voltage along the line, and frequency dependencies of impedances are obtained. The model adequacy was assessed using Fisher’s and Student’s criteria.

The third chapter presents the results of experimental studies of the harmonic composition of the reverse traction current in rail circuits. Two monitoring methods were developed and tested: stationary (at the interlocking station) and dynamic (during train movement). For the first time, the method of simultaneous signal measurement in four adjacent audio frequency rail circuits of the metro was applied during train entry, movement, and acceleration. It was found that in normal mode, canonical harmonics (100, 150, 200, 250, 300 Hz) from rectifiers predominate, while during train movement, additional 150 Hz and 300 Hz harmonics appear, caused by the operation of traction motors. For railway automation tasks, a method for classifying electromagnetic interference in rail circuits using machine learning is proposed. Parallel application of two models was implemented: a 1D Convolutional Neural Network (1D CNN) algorithm for analyzing raw time series, and a Random Forest (RF) classifier operating on the basis of 15 handcrafted features in the time and frequency domains. A synthetic dataset (3000 realizations) was generated for training, including clean signals and signals with typical interference (harmonic, impulsive, narrowband, noise). The models were calibrated (temperature scaling for CNN and Platt scaling for RF), which allowed obtaining realistic probability estimates. On the test set, both models achieved  $AUC > 0.99$ , with CNN showing slightly better results for impulsive and narrowband interference.

The fourth chapter fulfills the main task of the work – the means of ensuring rail circuit noise immunity, namely filters with nanocrystalline cores, were substantiated and developed. A mathematical apparatus for calculating the parameters of toroidal coils with a nanocrystalline core is presented. The frequency

characteristics of the developed coils were experimentally investigated in the range from 500 Hz to 20 kHz: a stable increase in impedance and phase shift angle was confirmed, indicating high efficiency of electromagnetic interference suppression. A comparative analysis with the existing ZBF-1 block filter was performed. The economic effect of implementing noise immunity means for coded and audio frequency rail circuits, i.e., filters with nanocrystalline cores, was calculated.

The aim of the dissertation is to increase the noise immunity of railway automation rail circuits by introducing filters with nanocrystalline cores based on improved mathematical models of electromagnetic interaction, analysis of the influence of traction currents and their harmonic components, as well as the development of methods and technical solutions for monitoring and reducing the level of electromagnetic interference.

To achieve this aim, the following tasks were set and solved in the work:

to analyze the current state of the electromagnetic compatibility problem in railway transport, to investigate the sources and propagation paths of electromagnetic interference in traction power supply and railway automation systems;

to improve the mathematical model of the traction power supply system with railway automation devices by increasing the system components and determining their electromagnetic interaction;

to conduct experimental and theoretical studies of electromagnetic processes in rail circuits, to substantiate a new method for studying electromagnetic interference using machine learning;

to investigate the possibility of introducing modern means of suppressing electromagnetic interference in railway automation systems by using filters with nanocrystalline cores.

The scientific novelty of the obtained results lies in:

the mathematical model of electromagnetic interaction between the traction power supply system and rail circuits has been improved, presented as a twelve-terminal network and differing from existing ones by taking into account the

electromagnetic coupling between the contact network, rail threads, VL SCB lines, 6(10) kV VL PE lines, and the ground;

for the first time, algorithms and methods for estimating the parameters of coded currents and electromagnetic interference have been developed by means of measurements at control points at the interlocking station simultaneously in four rail circuits, which makes it possible to assess the operation of railway automation systems without interrupting train traffic and to transition in the future from scheduled preventive maintenance of rail circuits to condition-based maintenance;

for the first time, a method for classifying electromagnetic interference based on machine learning with parallel application of a Convolutional Neural Network (CNN) and a Random Forest classifier has been developed;

for the first time, ways to increase noise immunity in coded and audio frequency rail circuits through the use of filters with nanocrystalline cores have been proposed, which contributes to improving the electromagnetic compatibility of the traction power supply system with railway automation devices, reducing the weight and size parameters of railway automation devices due to the characteristics of nanocrystalline materials.

The practical significance of the obtained results of the research work lies in their use in teaching the disciplines “Power Supply of Automation and Communication Systems” and “Electromagnetic Compatibility of Automation Systems,” which is confirmed by a corresponding implementation act.

The scientific results obtained in the dissertation made it possible to develop methods using modern measuring tools for automated measurement of coded current parameters and the levels and spectrum of electromagnetic interference at the interlocking station, which is confirmed by a corresponding implementation act.

Algorithms and software for implementing automated monitoring of electromagnetic interference in rail circuits using machine learning have been developed. The created effective methods for assessing electromagnetic interference can be used in the design, modernization, and operation of traction power supply systems and railway automation devices.

The scientific research was carried out in accordance with the integration strategy of Ukrzaliznytsia and Moldova into the European Union (EU), the Plan for the creation of Solidarity Lanes between the EU and Ukraine, and the Concept for the Development of Ukrzaliznytsia until 2030. The proposed approaches and models can be used to assess the electromagnetic environment on electrified railway sections and to justify measures to ensure electromagnetic compatibility.

**Keywords:** electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, traction current, rail circuits, motor, voltage, current, spectrum, modeling, magnetic saturation coefficient, railway automation, rectifier, electric train, railway transport.