

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ  
ННІ «ДНІПРОВСЬКИЙ ІНСТИТУТ ІНФРАСТРУКТУРИ І  
ТРАНСПОРТУ» МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ  
ННІ «ДНІПРОВСЬКИЙ ІНСТИТУТ ІНФРАСТРУКТУРИ І  
ТРАНСПОРТУ» МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна  
наукова праця на правах  
рукопису

**СЕРЧЕНКО МАКСИМ СЕРГІЙОВИЧ**

УДК 656.25:621.3

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ РЕЙКОВИХ КІЛ**  
**ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ**  
**ФІЛЬТРІВ З НАНОКРИСТАЛІЧНИМ ОСЕРДЯМ**

Галузь знань 027 – Транспорт

Спеціальність 273 – Залізничний транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктор філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Серченко Максим Сергійович

Науковий керівник Сердюк Тетяна Миколаївна, кандидат технічних наук,  
доцент кафедри «Автоматика та телекомунікації»

Дніпро – 2026

## 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., Реқун І. І., Токманова І. В., Чаркіна Т. Ю., Чудомех 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., Яндульський 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 нанокристалічній 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.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

### *Наукові праці, в яких опубліковані наукові результати:*

1. Evaluation of Electromagnetic Compatibility of Electric City Transport with the Automatics Systems / Serdiuk Tetiana, Binti Sapuan, Syarfa Zahirah, Mandaris Dwi, Serdiuk Kseniia, Radkevych Anatolii, Serchenko Maksym // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – 2023. – Vol. 2023-September : International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, Krakow, 4–8 September 2023. – DOI: 10.1109/EMCEurope57790.2023.10274245. **(Scopus)**
2. Сердюк, Т. М. Аналіз параметрів якості електричної енергії та пристроїв для їх вимірювання / Т. М. Сердюк, **М. С. Серченко** // Наука та прогрес транспорту. – 2023. – № 3. – С. 13–23. – DOI: 10.15802/stp2023/296329. **(фахове видання)**
3. Serdiuk, T. Method for Defining Electromagnetic Interferencies in the Metro Track Circuits / Serdiuk T., **Serchenko M.** // 24th IEEEIC International Conference on Environment and Electrical Engineering and 8th I and CPS Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/I and CPS Europe : Proceedings, Rome, 17–20 June 2024. – 2024. – DOI: 10.1109/IEEEIC/ICPSEurope61470.2024.10751038. **(Scopus)**
4. Modernization of the power supply system applying solar cells and batteries / Tetiana Serdiuk, **Maksym Serchenko**, Anatolii Radkevych, Svitlana Serdiuk, Viktor Skalko// MATEC Web of Conferences. – 2024. – Vol. 390 : 3rd International Scientific and Practical Conference “Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport” (EOT-2023). – 01001. **(Web of Science, Index Copernicus)** – DOI: 10.1051/matecconf/202439001001.
5. Monitoring Electromagnetic Interference and Code Current in the Station Interlocking System / Tetiana Serdiuk, **Maksym Serchenko**, Volodymyr Profatylov, Rodica Botnarevscaia, Dwi Mandaris, Artem Smirnov // Asia-Pacific International Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Taipei, Taiwan, May 19–23, 2025 / IEEE. – Taipei, 2025. **(Scopus)**

6. Canale, L. Study on EM Interferences Due to LED Lighting Sources and Their Impacts on the Railway Telecommunication System in Ukraine / Canale L., Serdiuk T., **Serchenko M.** // 2025 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2025 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC / I and CPS Europe 2025, Chania, Crete, 15–18 July 2025 / Institute of Electrical and Electronics Engineer (IEEE). – 2025. – **(Scopus)** DOI: 10.1109/IEEEIC/ICPSEurope64998.2025.11169275.

7. **Serchenko, M.** Dynamic Simulation of a Hybrid Solar Power System Under Fluctuating Irradiance Conditions / Serchenko M., Bekh Y., Serdiuk T. // 2025 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2025 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC / I and CPS Europe 2025, Chania, Crete, 15–18 July 2025 / Institute of Electrical and Electronics Engineer (IEEE). – 2025. **(Scopus)**– DOI: 10.1109/IEEEIC/ICPSEurope64998.2025.11169086.

8. Serdiuk, T. Monitoring Electromagnetic Interference in the Automation of Urban Rail Transport / Serdiuk T., **Serchenko M.**, Smirnov A. // Proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe, 1–5 September 2025, Paris, 2025 / Institute of Electrical and Electronics Engineer (IEEE). – 2025. – P. 953–958. – **(Scopus)** DOI: 10.1109/EMCEurope61644.2025.11176332.

***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:***

9. Електрифікація і електромагнітна сумісність систем тягового електропостачання з пристроями залізничної автоматики та зв'язку / Серченко М. С., Сердюк К. М., Денисенко Ю. Д., Сердюк Т. М., Скалько В. В. // Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті : тези XVI Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Дніпро, 14.12–15.12.2022) / М-во освіти і науки України, Укр. держ. ун-т науки і технологій, Схід. наук. центр трансп. акад. наук. – Дніпро, 2022. – С. 35. (тези конференції)

10. Serdiuk, T. M. Electromagnetic compatibility of railway automatic devices yesterday and tomorrow / Serdiuk T. M., Serchenko M. S., Serdiuk K. M. // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : матеріали 82 Міжнар. наук.-практ. конф., 20–21 квіт. 2023 р. / М-во освіти і науки України, Укр. держ. ун-т науки і технологій [та ін.]. – Дніпро, 2023. – С. 26–28. (тези конференції)

11. Серченко, М. С. Нормування показників якості електроенергії в електричних мережах загального призначення / Серченко М. С., Сердюк Т. М. // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : матеріали 82 Міжнар. наук.-практ. конф., 20–21 квіт. 2023 р. / М-во освіти і науки України, Укр. держ. ун-т науки і технологій [та ін.]. – Дніпро, 2023. – С. 23–24. (тези конференції)

12. Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті: забезпечення надійного зв'язку / Серченко М. С., Сердюк Т. М., Ботнарєвська Р. В., Леферінк Ф. // Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті : тези XVII Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Дніпро, 13.12–14.12.2023) / Укр. держ. ун-т науки і технологій [та ін.]. – Дніпро, 2023. – С. 36. (тези конференції)

13. Серченко, М. С. Діагностика та моніторинг електромагнітних завод у пристроях залізничної автоматики / Серченко М. С. ; керівник Сердюк Т. М. // Наука і сталий розвиток транспорту 2024 : зб. тез доп. Всеукр. наук.-техн. конф. студентів і молодих учених, 27 листоп. 2024 р. / Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро, 2024. – Т. 2. – С. 60. (тези конференції)

14. Серченко, М. С. Впровадження міжнародних стандартів з електромагнітної сумісності в системах тягового електропостачання залізниць / Серченко М. С. ; керівник доц. Сердюк Т. М. // Наука і сталий розвиток транспорту 2024 : зб. тез доп. Всеукр. наук.-техн. конф. студентів і молодих учених, 27 листоп. 2024 р. / Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро, 2024. – Т. 2. – С. 48–49. (тези конференції)

15. Застосування швидкого перетворення Фур'є та Вейвлет перетворень для аналізу гармонік сигналів рейкових кіл / Серченко М. С., Смірнов А. О., Сердюк Т. М., Ботнаревская Р. В. // Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті : тези XVIII Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Дніпро, 12.12–13.12.2024) / М-во освіти і науки України, Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро, 2024. – С. 39. (тези конференції)

16. Переваги та недоліки існуючих методів і схем захисту систем тягового електропостачання залізниць. Поточний стан проблеми / Серченко М. С., Сердюк Т. М., Скалько В. В., Сапеску А. Є., Ботнаревская Р. В. // Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті : тези XVIII Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Дніпро, 12.12–13.12.2024) / М-во освіти і науки України, Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро, 2024. – С. 36. (тези конференції)

17. Modernization of renewable power system of railway automatics / Serdiuk T. M., Serchenko M. S., Kovalenko I. S., Ovchynnikov A. V., Bekh Ya. P., Hetalo V. A., D. Mandaris // Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті : тези XVIII Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Дніпро, 12.12–13.12.2024) / М-во освіти і науки України, Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро, 2024. – С. 22. (тези конференції)

18. Серченко, М. С. Використання гібридних джерел енергії на неелектрифікованих ділянках залізничного транспорту: виклики, рішення, перспективи / Серченко М. С. ; керівник доц. Сердюк Т. М. // Молода академія – 2025 : зб. тез Міжнар. наук.-техн. конф. студ. і молодих учених (22–23 трав. 2025 р., м. Дніпро) / Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро, 2025. – Т. 2. – С. 84–85. (тези конференції)

19. Електромагнітна сумісність залізничної автоматики та зв'язку з системами зовнішнього і тягового електропостачання / Серченко М. С., Грохов М. Ю., Невідома В. С., Федотова Є. А., Сапеску А. Є. ; керівник доц.

Сердюк Т. М., ст. викл. Скалько В. В. // Молода академія – 2025 : зб. тез Міжнар. наук.-техн. конф. студ. і молодих учених (22–23 трав. 2025 р., м. Дніпро) / Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро, 2025. – Т. 2. – С. 79–80. (тези конференції)

20. Innovate Ukraine – using “green” technologies in the transportation / Beh Ya., Serchenko M., Hrohov M., Nevidoma V., Fedotova Ye. ; supervisors assoc. prof. Serdiuk T., lecture Skalko V. // Молода академія – 2025 : зб. тез Міжнар. наук.-техн. конф. студ. і молодих учених (22–23 трав. 2025 р., м. Дніпро) / Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро, 2025. – Т. 2. – С. 85–86. (тези конференції)

21. Serchenko, M. Ensuring electromagnetic compatibility in rail traffic: standards, testing, and safety measures / Serchenko M., Smirnov A. ; supervisor assoc. prof. Serdiuk T. // Молода академія – 2025 : зб. тез Міжнар. наук.-техн. конф. студ. і молодих учених (22–23 трав. 2025 р., м. Дніпро) / Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро, 2025. – Т. 2. – С. 77. (тези конференції)

Внесок автора у наукові публікації, що написані у співавторстві: в публікаціях [1], що індексується у наукометричній базі Scopus, автор досліджував джерела електромагнітного випромінювання, формував висновки; в фаховій публікації [2] автор аналізував існуючі пристрої для вимірювання електромагнітної ситуації та формував висновки; у [6] досліджував можливість покращення системи електропостачання шляхом впровадження сучасних технологій, формував висновки роботи; В статтях [3, 5, 8] що індексуються у наукометричній базі Scopus приймав участь у збиранні експериментальних даних та їх обробці, створенні алгоритмів моніторингу; в публікації [8] автор приймав участь у експериментальній частині випробувань та у обробці результатів вимірювань, аналізу публікацій по темі статті; В статті [4], що індексується у наукометричній базі Scopus, автор розробляв модель для симуляції фізичних процесів гібридної системи електропостачання та формуванні висновків.

В матеріалах [9 – 21] автор висвітлював основні положення розділів дисертації, що є апробацією виконання роботи.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	23
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ПРИСТРОЯМИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ.....	28
1.1 Проблеми електромагнітної сумісності та їх вирішення на залізничному транспорті України .....	28
1.1.1 Розвиток систем тягового електропостачання залізниці та вирішення проблем забезпечення електромагнітної сумісності із пристроями залізничної автоматики.....	29
1.1.2 Класифікація джерел та видів електромагнітних завад .....	31
1.1.3 Функціонування пристроїв залізничної автоматики в умовах електромагнітного впливу з боку системи тягового електропостачання.....	33
1.2 Сучасний стан та аналіз існуючих методів дослідження електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання з пристроями залізничної автоматизації і схем захисту .....	34
1.2.1 Моніторинг електромагнітних завад в тяговій мережі .....	34
1.2.2 Переваги та недоліки існуючих методів та схем захисту. Сучасний стан проблеми .....	38
1.3 Стандартизація електромагнітних впливів на пристрої залізничної автоматики .....	39
1.4 Аналіз математичних моделей системи тягового електропостачання з урахуванням електромагнітного впливу на пристрої залізничної автоматики.....	41
1.5 Технічне обслуговування рейкових кіл .....	44
1.6 Висновки за розділами .....	48
РОЗДІЛ 2 . МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ ТА ПРИСТРОЇВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ.....	50
2.1. Математична модель багатопровідної системи електропостачання	50
2.2 Результати моделювання двоконтурної системи.....	56

2.3	Оцінка адекватності розробленої математичної моделі .....	67
2.4.	Висновки за розділом .....	71
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ		
ГАРМОНІЙНОГО СКЛАДУ ТЯГОВОГО СТРУМУ.....		73
3.1.	Методи вимірювання гармонічних завад в рейковому колі .....	73
3.2.	Моніторинг електромагнітних перешкод та кодового струму в системі централізації станції при електричній тязі постійного струму .....	77
3.3.	Методи контролю параметрів кодового струму та електромагнітних завад у метрополітені.....	82
3.3.1.	Контроль параметрів рейкового кола і електромагнітних завад на посту ЕЦ.....	82
3.3.2	Метод дослідження електромагнітних завад у метрополітені одночасно з декількох РК.....	86
3.4.	Використання алгоритмів машинного навчання для класифікації електромагнітних завад у рейкових колах.....	94
3.5	Висновки за розділом .....	103
РОЗДІЛ 4. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ПРИСТРОЇВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ З СИСТЕМОЮ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ .....		
		105
4.1.	Розробка мережевих та низькочастотних фільтрів із нанокристалічним осердям.....	105
4.2.	Результати експериментальних досліджень, які підтверджують ефективність впровадження фільтрів із нанокристалічним осердям .....	112
4.3	Розробка фільтрів для тональних рейкових кіл третього покоління з використаннями нанокристалічних осердь .....	115
4.4.	Економічний ефект впровадження фільтрів із нанокристалічними осердями.....	124
4.5.	Висновки за розділом .....	128
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....		130
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		135

ДОДАТКИ.....	150
ДОДАТОК А. Програмний код машинного навчання для класифікації електромагнітних завад у зворотному тяговому струмі .....	151
ДОДАТОК Б. Акти про впровадження результатів дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії Серченко Максима Сергійовича.....	156

## ВСТУП

Сучасний етап розвитку залізничного транспорту України характеризується інтенсивним впровадженням електрифікованих ділянок, зростанням потужності тягових навантажень, застосуванням напівпровідникових перетворювальних пристроїв та широким використанням мікропроцесорних систем керування рухом поїздів. За цих умов система тягового електропостачання перетворюється на один із найбільш потужних джерел електромагнітних завад, які поширюються через контактну мережу, рейкові кола та суміжні інженерні системи. Особливої актуальності набуває проблема забезпечення електромагнітної сумісності між силовими тяговими установками та пристроями залізничної автоматики і зв'язку, від надійної роботи яких безпосередньо залежить безпека руху поїздів.

Інтеграція України до європейського транспортного простору, гармонізація нормативної бази з вимогами Європейського Союзу, впровадження сучасних систем сигналізації, автоматичного керування поїздами, цифрових каналів зв'язку та дистанційної діагностики істотно підвищують вимоги до електромагнітної обстановки на електрифікованих ділянках залізниць. При цьому значна частина існуючої інфраструктури проєктувалася без урахування впливу широкосмугових завад, гармонічних складових тягового струму та імпульсних процесів, характерних для сучасних силових перетворювачів. Це обумовлює виникнення хибних спрацьовувань рейкових кіл, збоїв у роботі систем автоблокування, автоматичної локомотивної сигналізації та цифрових засобів зв'язку.

Аналіз наукових джерел свідчить, що попри значну кількість досліджень у галузі електромагнітної сумісності, проблема комплексного врахування спектрального складу тягових струмів, умов поширення електромагнітних завад та особливостей функціонування сучасних пристроїв залізничної автоматики залишається недостатньо вирішеною. Це визначає

необхідність розробки узагальнених математичних моделей електромагнітної взаємодії, які дозволяють кількісно оцінювати рівні завад, прогнозувати їх вплив та обґрунтовувати технічні заходи щодо підвищення завадостійкості.

Таким чином, дисертаційна робота спрямована на розв'язання актуальної науково-практичної задачі забезпечення електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання з пристроями залізничної автоматики в умовах модернізації та цифровізації залізничного транспорту України.

Наукова ідея дисертаційної роботи полягає у підвищенні завадостійкості рейкових кіл залізничної автоматики шляхом розробки та впровадження фільтрів з нанокристалічним осердям, які завдяки унікальним магнітним властивостям (висока магнітна проникність, висока індукція насичення, низькі втрати) забезпечують ефективне придушення гармонічних складових зворотного тягового струму в широкому діапазоні частот, а також розробки інтелектуальних методів діагностики ЕМЗ на основі машинного навчання для переходу від планово-попереджувального обслуговування до обслуговування за фактичним станом.

**Мета роботи** – є підвищення завадостійкості рейкових кіл залізничної автоматики шляхом впровадження фільтрів з нанокристалічним осердям на основі удосконалення математичних моделей електромагнітної взаємодії, аналізу впливу гармонічних складових тягового струму та розробки методів діагностики електромагнітних завад з використанням машинного навчання.

**Об'єкт дослідження** є процес електромагнітної взаємодії системи тягового електропостачання та рейкових колах залізничної автоматики в умовах впливу електромагнітних завад.

**Предмет дослідження** методи та засоби підвищення завадостійкості рейкових кіл шляхом впровадження фільтрів з нанокристалічним осердям, а також методи контролю параметрів рейкових кіл та класифікації електромагнітних завад із використанням машинного навчання.

**Наукова новизна** результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що:

1. 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.

2. 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 системи залізничної автоматики без перерви в русі поїзда і перейти у подальшому від планово-попереджувального технічного обслуговування рейкових кіл до обслуговування «за станом» об'єкту.

3. Вперше розроблено метод класифікації електромагнітних завад на основі машинного навчання із паралельним застосуванням згорткової нейронної мережі CNN та класифікатора Random Forest.

4. 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.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові положення, результати та висновки, що виносяться на захист, отримані автором особисто. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать постановка задачі дослідження, розробка математичних моделей, проведення комп'ютерного моделювання, аналіз отриманих результатів та формулювання висновків. Ідеї та результати інших авторів використані з обов'язковим посиланням на відповідні джерела.

**Апробація матеріалів дисертації.** Матеріали дисертаційної роботи викладалися на таких наукових заходах: Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті, Дніпро, 2022; Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту Дніпро, 2023; IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Krakow, 2023.; Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті, Дніпро, 2023. Наука та прогрес транспорту. – 2023.; Наука і сталий розвиток транспорту, Дніпро, 2024; Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті, Дніпро, 2024; 24th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 8th I and CPS Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/I and CPS Europe : Proceedings, Rome, 2024.; MATEC Web of Conferences: 3rd International Scientific and Practical Conference “Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport” (EOT-2023).; Молода академія – 2025, м. Дніпро; Asia-Pacific International Symposium and Exhibition

on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Taipei, 2025.; Proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe, Paris, 2025 , 2025 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2025 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC / I and CPS Europe 2025, Chania, Crete, 15–18 July 2025 / Institute of Electrical and Electronics Engineer (IEEE). – 2025.

**Публікації.** За темою дисертації «Підвищення завадостійкості рейкових кіл залізничної автоматики шляхом впровадження фільтрів з нанокристалічним осердям» опубліковано 21 наукову працю, що повністю розкривають основний зміст дисертаційної роботи та є апробацією результатів, отриманих при підготовці дисертаційної роботи, з яких 6 статей у виданні, що індексується у наукометричній базі Scopus, 1 статтю у виданні, що індексується у наукометричній базі Index Copernicus, 1 статтю у фоховому журналі категорії «Б»

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 160 сторінок, з яких основний текст займає 106 сторінок, містить 65 рисунків та 14 таблиць. Список використаних джерел налічує 138 найменувань. Додатки містять програмний код машинного навчання та акти про впровадження результатів

# РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ПРИСТРОЯМИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ

## 1.1 Проблеми електромагнітної сумісності та їх вирішення на залізничному транспорті України

Інтеграція українського залізничного транспорту до Європейського Союзу згідно з Меморандумом та Національною транспортною стратегією України до 2030 року [1–6] передбачає не лише гармонізацію ширини колії, але й дослідження та розробку технічної документації щодо гармонізації телекомунікаційних систем, сумісності систем автоматичного керування поїздами та електромагнітної сумісності (ЕМС). Цим питанням присвятили роботи Мірошник Р.О. [3], Кердан О.С. та ін. [7], Корінь М.В. [8], Рекун І.І. [9], Чудомєх І.О. [10], Чаркіна Т.Ю. [11], Овчиннікова В.О. [12], Папайка Ю.А. [13], Думанський Ю.Д. [14].

Внесок у дослідження ЕМС та завадостійкості пристроїв залізничної автоматики зробили Думанський Ю.Д. [14], Бондаренко Б.М. [15], Романцев І.О. [15], Мозолевич Г.Я. [15], Гаврилюк В.І. [16–19], Сердюк Т.М. [16–24, 26, 32], Панасенко М.В. [25], Сиченко В.Г. [25], Леонов С.Ю. [27], Іванов В.О. [28], Габрусенко Є.І. [28], Ільницький Л.Я. [28], Щербіна О.А. [28], Головін Ю.О. [29], Шолохов С.М. [29], Самборський І.І. [29], Яндульський О.С. [30]. Серед зарубіжних вчених – Чанкай Ся [31], Франк Леферінк [33], Клейтон Пол [34], Генрі В. Отт [35], Флавіо Канаверо [36,37], Кейзер Кенет [38], Четан Каталай [39], Вільямс Т. [40].

В Україні немає окремої національної програми, присвяченої виключно ЕМС енергосистеми з новим обладнанням, електротранспортом, залізничною автоматикою та зв'язком; ця сфера інтегрована в загальні технічні та регуляторні ініціативи. Актуальність теми зумовлена збільшенням кількості

електрифікованих ліній, інтенсивністю використання тягових систем та впровадженям нових автоматизованих систем керування поїздами [14].

ЕМС на залізничному транспорті має вирішальне значення для безперебійної роботи пристроїв в електромагнітному середовищі. Джерела завад – системи тягового електропостачання, локомотиви, системи сигналізації, управління, зв'язку та автоматизації – можуть спричиняти електричні поля, струми витoku, електростатичні розряди та індуковані сигнали, що впливають на інфраструктуру та транспортні засоби [42]. Узагальнене уявлення завдань забезпечення ЕМС наведено на рис. 1.1 [41].

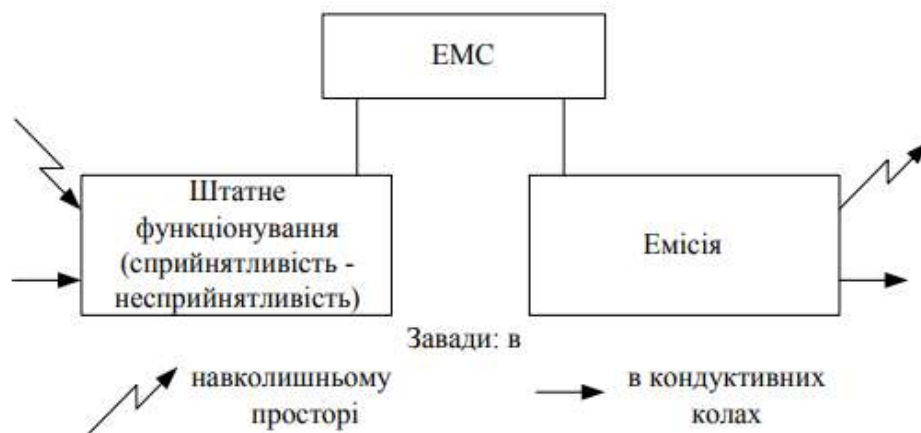


Рисунок 1.1 – Узагальнене уявлення завдань забезпечення електромагнітної сумісності

Надійна робота систем сигналізації першорядна для безпеки руху, особливо на електрифікованих ділянках. Застаріла інфраструктура (старі електромережі, локомотиви без захисту, погано ізольовані лінії зв'язку) створює ризики ЕМС.

### **1.1.1 Розвиток систем тягового електропостачання залізниці та вирішення проблем забезпечення електромагнітної сумісності із пристроями залізничної автоматики**

Електрифікація української залізниці розпочалася в першій половині 20 століття. Перші колії постійним струмом 3 кВ з'явилися в 30-ті роки. У 1950–1960-х роках введення електровозів змінного струму спричинило збої пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ). Інженерам

довелося розробляти фільтри та ізоляційні бар'єри для захисту ліній зв'язку від електромагнітних завад (ЕМЗ) [44]. Структурну схему електропостачання залізниць змінного струму наведено на рис. 1.2.

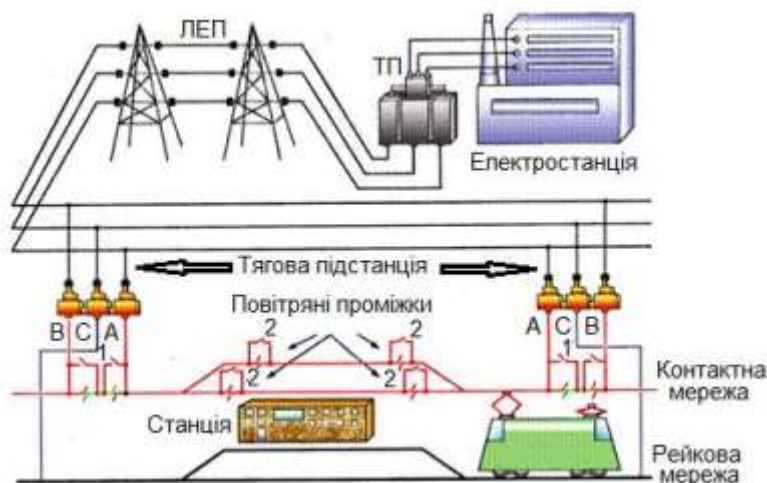


Рисунок 1.2 – Розподіл електричної енергії через підстанції змінного струму

У 1990–2000-х роках із впровадженням складних електронних систем управління та автоматизації питань ЕМС загострилося. Сучасні технології дозволяють зменшити завади. Перехід до електронного перетворення енергії (тягові інвертори замість резисторного регулювання) забезпечує рекуперативне гальмування, плавний пуск, але генерує широкосмуговий кондуктивний та випромінюваний шум [44]. Активні випрямлячі (АВ) дають синусоїдальний струм, але самі є джерелом високочастотного шуму через широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ). Сучасні СЦБ та системи зв'язку (GSM-R, радіозв'язок, кабельні мережі) на мікропроцесорній технології вразливі до ЕМЗ [45].

Дослідження збоїв ЕМС на залізницях Європи та Північної Америки показують, що 15–30 % незрозумілих збоїв апаратури СЦБ та зв'язку, ймовірно, пов'язані з ЕМС [46]. Наслідки: хибне зайняття/звільнення колії (зіткнення або невиправдане гальмування), несанкціоноване перемикання стрілок, втрата зв'язку з поїздом, перебої живлення СЦБ [47].

Вирішення проблеми ЕМС вимагає комплексного підходу: суворі стандарти та випробування, детальні дослідження перед плануванням

(моделювання поширення завад, оцінка впливу на СЦБ та зв'язок) [48,49]; технічні засоби – фільтрація (вхідні/вихідні мережеві фільтри, фільтри ЕМС, активні фільтри гармонік [50]), екранування силових кабелів та шаф [51]; встановлення високочастотних фільтрів на підстанціях, локомотивах, сигнальних системах [52]. Питаннями фільтрації займалися Тихенко О.М. [49], Бондаренко Ю.С. [50,51], Семененко О.І. [52,53], Сердюк Т.М. [54], закордонні – Сюецзюнь Фан [55], Каусар Айеша [56].

Необхідне впровадження систем моніторингу та діагностики для раннього виявлення несправностей [57] – систем контролю якості електроенергії або діагностики ЕМС. Внесок зробили Мойсеєнко В.І. [58], Чегодаєв Б.В. [58], Гаврилюк В.І. [61], Сердюк Т.М. [60,63], Швець А.В. [59], Кривонос А.П. [59].

Майбутній розвиток: модернізація електрифікованих ділянок, енергоефективні технології, комплексні системи моніторингу ЕМС з використанням штучного інтелекту, міжнародна співпраця. Організаційні заходи: регулярні випробування, навчання персоналу, стандарти допустимих ЕМЗ [62]. Економічний аспект: зменшення втрат від збоїв, підвищення конкурентоспроможності. Використання нановолокон для екранування кабелів може зменшити завади.

### **1.1.2 Класифікація джерел та видів електромагнітних завад**

Класифікація ЕМЗ є важливим кроком у розробці методів боротьби. Різні рівні класифікації наводили Єрмоленко Л.П. [65], Пілінський В.В. [66], Бибик Р.Т. [67], Наконечний Ю.М. [67], Терещенко Д.В. [68], Зіньковський Ю.Ф. [70], Бутенко О.О. [69], Клименко В.Г. [70]. Узагальнену класифікацію за природою джерела наведено на рис. 1.3, загальну класифікацію – на рис. 1.4.

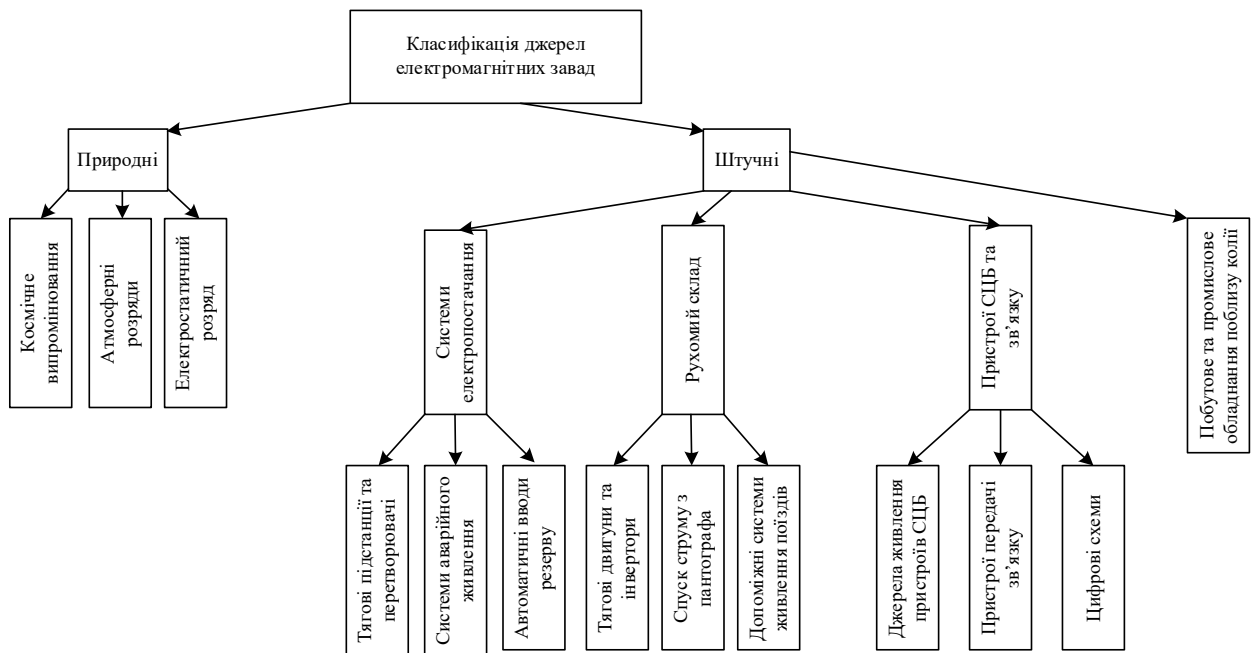


Рисунок 1.3 – Класифікація електромагнітних завад за природою джерела

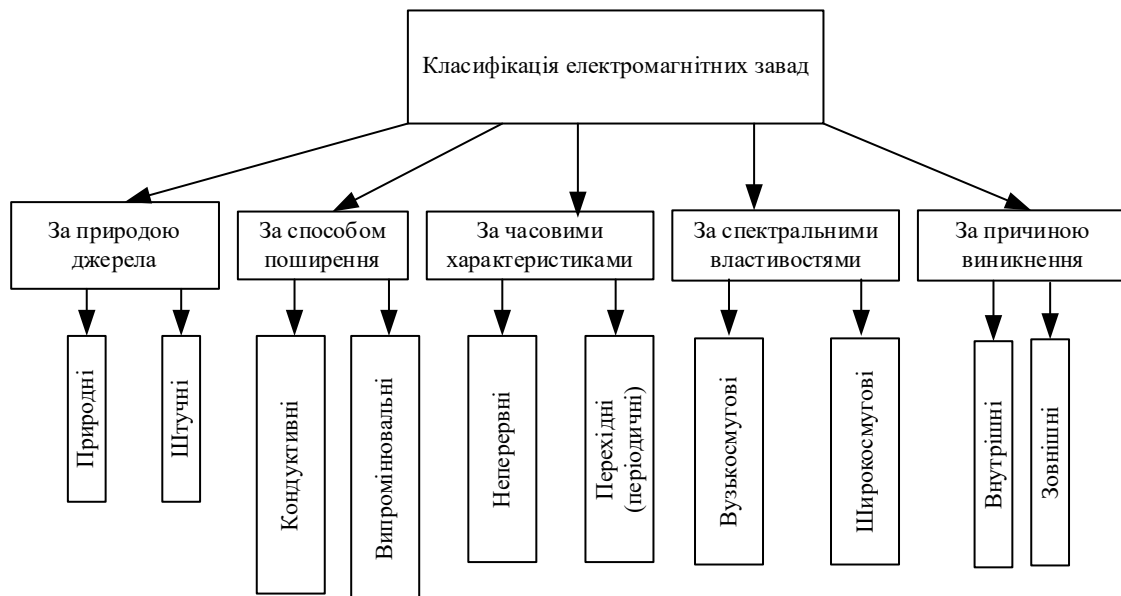


Рисунок 1.4 – Класифікація електромагнітних завад

За способом поширення ЕМЗ поділяють на кондуктивні (через провідники) та випромінювані [71].

Кондуктивні: гармоніки напруги (50, 150, 250 Гц тощо) від нелінійних навантажень – призводять до перегріву трансформаторів, помилок в аналогових схемах СЦБ [74]; провали/стрибки/перебої напруги від перемикачів, АВР, КЗ – до перезавантажень контролерів СЦБ, збоїв [72]; кондуктивні радіочастотні завади від ШІМ-перетворювачів – до збоїв

мікропроцесорів, помилок передачі даних [73]; імпульсні завади від комутацій (наприклад, блискавки); завади в сигнальних колах від гальванічного зв'язку або паразитних ємностей/індуктивностей.

Випромінювані: електричне поле (ємнісний зв'язок), магнітне поле (індуктивний зв'язок), електромагнітне поле (тягові інвертори, передавачі, іскріння) [75].

За часовими характеристиками: неперервні (гармоніки, високочастотний шум) та перехідні (одиначні/періодичні імпульси, провали, перенапруги, переривання живлення). За спектром: вузькосмугові та широкосмугові. За причиною виникнення: внутрішні (від пристроїв всередині системи) та зовнішні (блискавки, промислові об'єкти, радіостанції). Наслідки: хибні тривоги, погіршення якості сигналу, деструктивні завади (пошкодження компонентів), тривалі збої [77,78]

### **1.1.3 Функціонування пристроїв залізничної автоматики в умовах електромагнітного впливу з боку системи тягового електропостачання**

Дослідженням електромагнітного впливу займалися Вісін М.Г. [79], Бондаренко Ю.С. [80], Романцев І.О. [81], Сердюк Т.М. [82–87], Гаврилюк В.І. [84–86], закордонні – Хоссейн Тагізаде Ансарі [87], Дай В [88], Фан Лінцзін [89], Чжан Чжао [90], Ян Сюефань [91], Хафте Хаєлом Адхена [92,93], Девід Томас [92,93].

Найвразливіші пристрої – рейкові кола (автоматичне блокування). Сигнальний струм певної частоти проходить через рейки, а тяговий струм (постійний або змінний 50 Гц) повертається по рейках, порушуючи сигнал («приглушує»), що призводить до хибної індикації зайнятості/звільнення. Автоматична локомотивна сигналізація неперервної дії (АЛСН) передає інформацію через рейкові кола; завади можуть фальсифікувати коди (жовтий сприймається як зелений) або придушити сигнал, викликаючи екстрене гальмування. Електричні рейкові кола стрілочних переводів можуть замикати контакти контролера положення стрілки через тяговий струм [92].

Пристрої з довгими кабельними лініями (диспетчерська централізація) діють як антени, вловлюючи випромінювання від контактної мережі та тягових струмів, що спричиняє завади зв'язку. Датчики моніторингу (перегрів букс, дефекти рейок) можуть реагувати на сильне магнітне поле. Релейне обладнання більш стійке, але високі стрибки напруги можуть спричинити пробій ізоляції. Мікропроцесорні блоки СЦБ чутливі до стрибків та високочастотних завад, що може призвести до збоїв програми.

## **1.2 Сучасний стан та аналіз існуючих методів дослідження електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання з пристроями залізничної автоматизації і схем захисту**

### **1.2.1 Моніторинг електромагнітних завад в тяговій мережі**

Розробка методів діагностики ЕМЗ стає стратегічним завданням [96]. Джерела завад: нелінійні процеси в перетворювачах (IGBT, SiC, GaN) – широкосмугові імпульсні завади; гармонійні спотворення струму (3-тя, 5-та, 7-ма гармоніки); складна природа рейки як провідника та антени (неідеальність баластних з'єднань, корозія, опір ґрунту); перехідні процеси, атмосферні розряди, сусідні ЛЕП.

Діагностика поєднує експериментальні вимірювання з моделюванням. Пряме вимірювання: випромінювані завади – калібровані антенні системи (стандарти EN 50121 [93]); кондуктивні завади – датчики струму (кліщі Роговського, трансформатори струму); лабораторні випробування на стійкість (IEC 61000-4-4, -5 [98,99]). Обмеження: висока вартість, складність вимірювань на діючій інфраструктурі.

Комп'ютерне моделювання (методи скінченних елементів (MCE), скінченних різниць у часовій області, пакети ANSYS HFSS, CST Studio Suite, COMSOL Multiphysics) дозволяє прогнозувати розподіл полів, шляхи поширення, резонанси. Перевага – можливість віртуального моделювання складних сценаріїв. Інтеграція вимірювань для калібрування моделей

підвищує надійність [97]. Перспективні гібридні методи з використанням машинного навчання для раннього виявлення аномалій.

Спектральний аналіз ЕМЗ (рис. 1.5), часовий аналіз (рис. 1.6), метод дослідження електромагнітних полів (рис. 1.7), метод моделювання ЕМЗ (рис. 1.8), практичне тестування на ЕМС (рис. 1.9) є важливими інструментами.

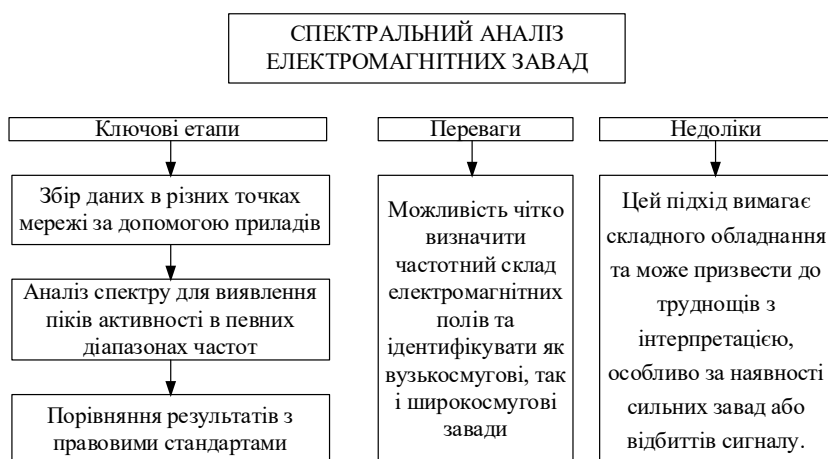


Рисунок 1.5 – Спектральний аналіз електромагнітних завад

Часовий аналіз електромагнітних завад даний на рис.1.6, зосереджений на розумінні змін електромагнітних завад з часом. Цей метод дозволяє виявляти ритмічні або нерегулярні електромагнітні імпульси, які можуть виникати під час роботи тягового обладнання або через взаємодію з додатковими технологічними системами.



Рисунок 1.6 – Часовий аналіз електромагнітних завад

Метод дослідження та аналізу електромагнітних полів представлений на рис. 1.7, включає вимірювання просторового розподілу як електричних, так і магнітних полів у межах залізничної інфраструктури. Ця оцінка є критично важливою для розуміння того, як ці поля поширюються в просторі та який вплив вони можуть мати на різні компоненти, включаючи системи сигналізації та керування.

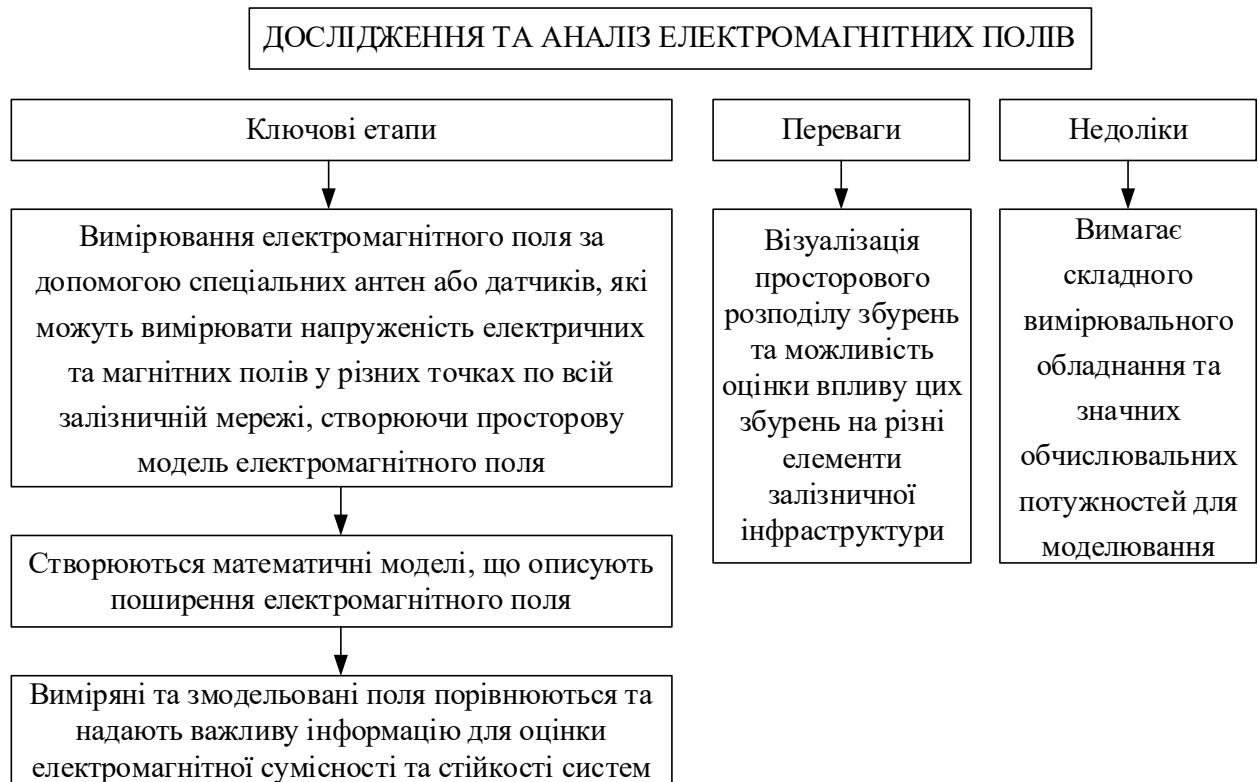


Рисунок 1.7 – Метод дослідження та аналізу електромагнітних полів

Моделювання електромагнітних завад є важливим інструментом для прогнозування їхнього впливу на різні компоненти залізничної інфраструктури. Цей процес включає моделювання електромагнітних умов та аналіз впливу збурень на елементи системи. Метод моделювання електромагнітних завад дан на рис.1.8.

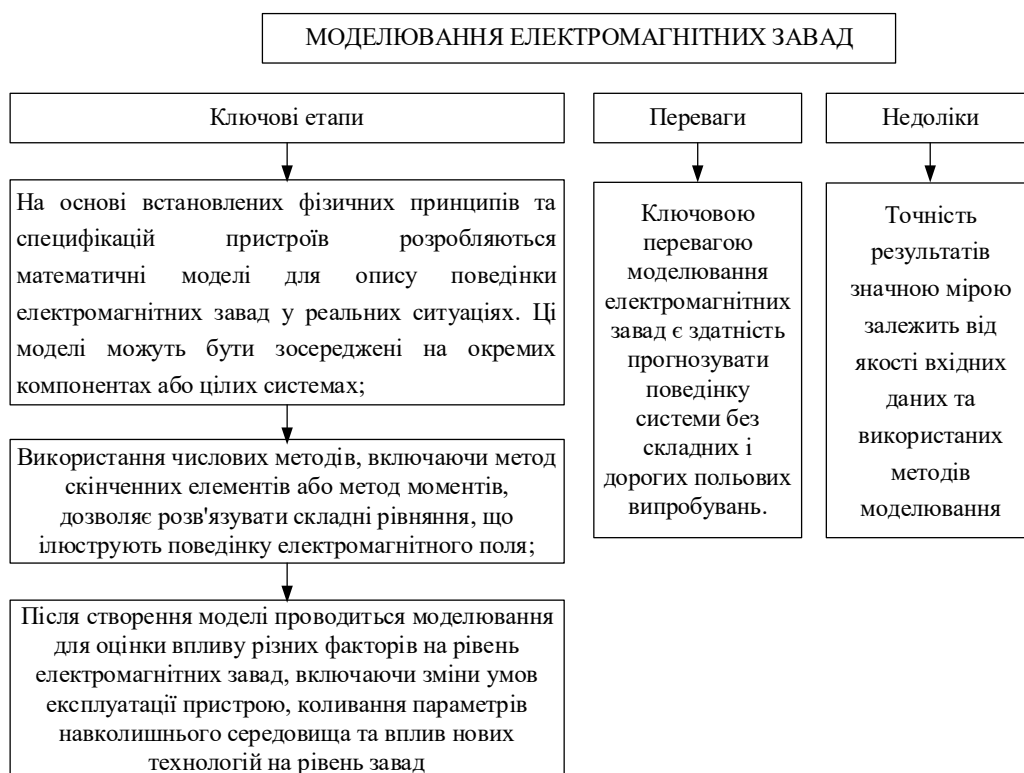


Рисунок 1.8 – Метод моделювання електромагнітних завад

Останнім методом дослідження електромагнітних завад є практичне тестування на електромагнітну сумісність. Це передбачає підтвердження раніше визначених результатів за допомогою реальних або змодельованих експериментів. Ці тести необхідні для оцінки стійкості систем до електромагнітних полів та визначення захисних заходів. Приклад практичного тестування на електромагнітну сумісність дан на рис. 1.9.

Для отримання всебічного розуміння електромагнітної сумісності залізничної інфраструктури необхідний синтез різних методів дослідження. Використання багатогранної перспективи дозволяє комплексно оцінити вплив електромагнітних полів з різних точок зору, включаючи частотні характеристики, просторовий розподіл та часові зміни.

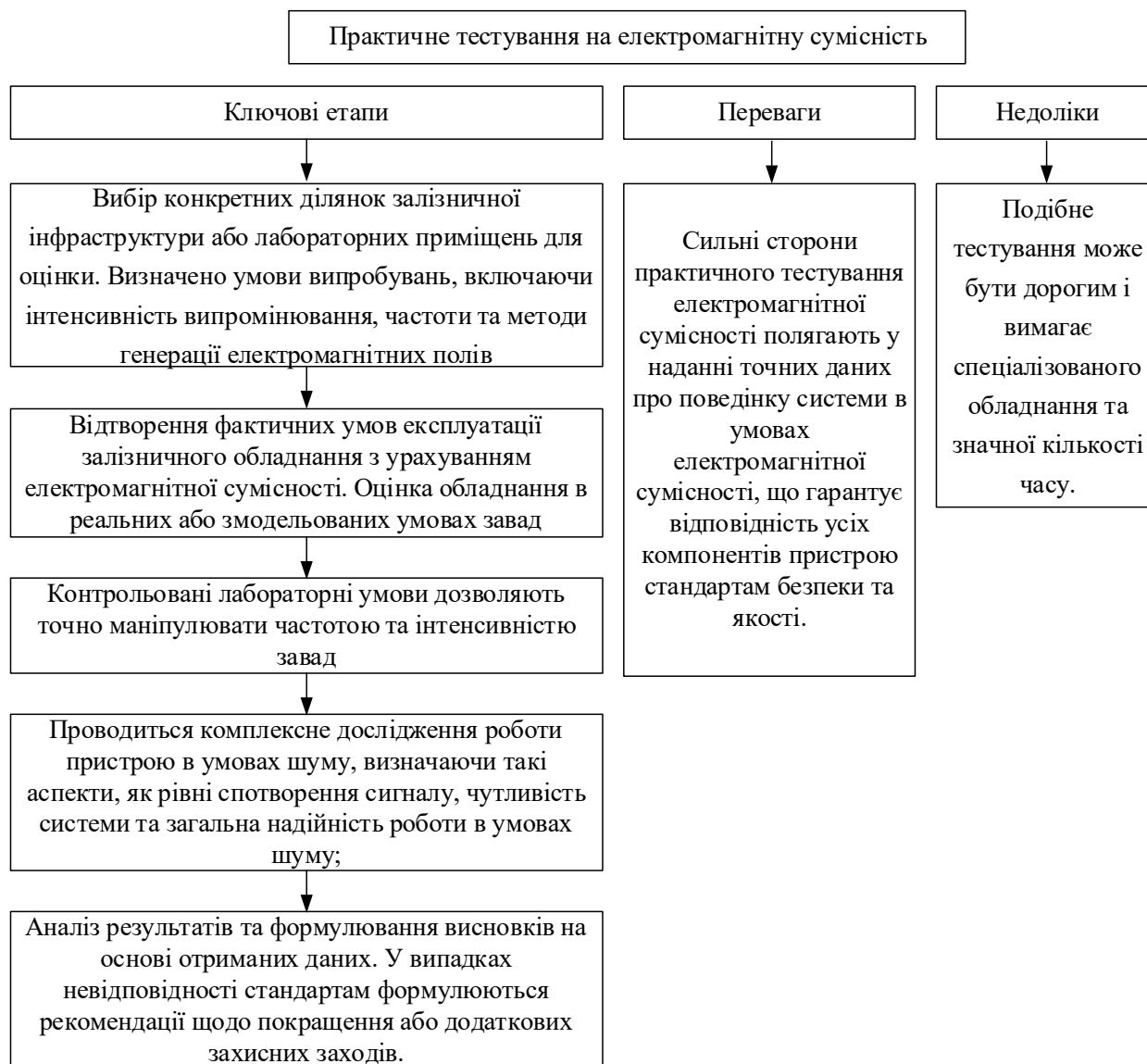


Рисунок 1.9 – Практичне тестування на електромагнітну сумісність

Комплексна стратегія дослідження дозволяє ідентифікувати джерела завод, оцінити вплив, прогнозувати роботу систем, підтвердити відповідність стандартам, розробити стратегію зменшення впливу.

### 1.2.2 Переваги та недоліки існуючих методів та схем захисту. Сучасний стан проблеми

Ефективний захист від ЕМЗ вимагає синергії пасивних та активних технологій. Існуючі методи досягли успіху у відповідності стандартам (EN 50121, IEC 62236) [93,100,101], але мають обмеження через зростання перевезень, потужності тягових систем, впровадження цифрових систем зв'язку та автоматичного керування.

Пасивний захист: фільтрація (LC, RC, ЕМІ фільтри) – простота, надійність, але збільшення ваги/вартості, втрати потужності, зниження ефективності на частотах вище сотень МГц, можливі резонанси. Екранування (екрановані кабелі, металеві корпуси) – висока ефективність у широкому діапазоні, але дорожнеча, складність монтажу, неефективність на низьких частотах (потрібні магнітні екрани). Заземлення та зрівнювання потенціалів – запобігає різниці потенціалів, але складне через вібрацію, корозію, змінні ґрунтові умови; на високих частотах заземлення стає розподіленим завданням.

Активні та гібридні методи: пристрої захисту від перенапруг (варистори, газорозрядні трубки, супресорні діоди) – швидка реакція, але деградація після сильних імпульсів, паразитні ємності. Активні фільтри гармонік – висока точність, адаптація, але висока вартість, складність, обмежена ефективність проти широкосмугових імпульсів. Інтелектуальні системи моніторингу та адаптивного захисту (датчики ЕМ полів, штучний інтелект (ШІ), машинне навчання) – проактивний підхід, але висока технологічна складність, вартість, проблеми стандартизації [103].

Сучасний стан: збільшення потужності тягових засобів (SiC, GaN, рекуперативне гальмування) підвищує рівень завад; цифрова революція (ETCS, LTE-R, FRMCS) знизилася стійкість пристроїв; щільність інфраструктури створює складне електромагнітне середовище; моделювання складних систем залишається ресурсоємним; стандартизація відстає від технологій; економічний тиск обмежує впровадження комплексного захисту.

### **1.3 Стандартизація електромагнітних впливів на пристрої залізничної автоматики**

Стандартизація ЕМС для автоматизації залізниць – обов'язковий регуляторний бар'єр. Основа – серія EN 50121 [85,93,102] та міжнародний еквівалент ІЕС 62236 [100,101], ІЕС 61000 [98,99]. Стандарти ЕМС в Україні представлені на рис. 1.10.

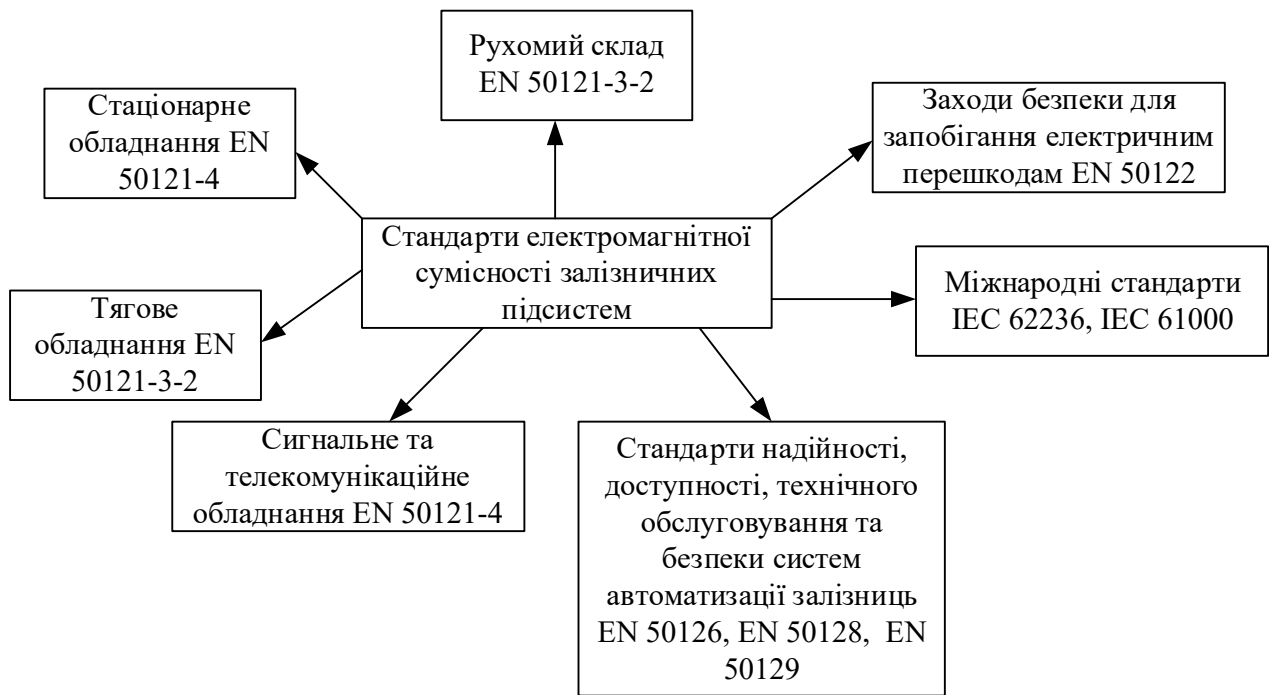


Рисунок 1.10 – Стандарти електромагнітної сумісності в Україні

Визначаються дві групи вимог: емісія та стійкість (пріоритет – стійкість). Цим питанням присвячували роботи Пантелят М. [103], Князев В.В. [104], Каштанов С.Ф. [105], Неєжмаков П.І. [106], Буряковський С.Г. [106], Руденко С.С. [106], Халмурадов Б.Д. [107].

EN 50121-4 визначає рівні випробувань стійкості обладнання автоматики (шафи реле, контролери, блоки ETCS, рейкові кола, комунікаційне обладнання) до імпульсних збурень, радіочастотних полів, магнітних полів промислової частоти (IEC 61000-4-8), електростатики (ESD – IEC 61000-4-2) [108], провалів/переривань напруги (IEC 61000-4-11/29 [108]), кондуктивних завад (IEC 61000-4-16 [108]).

Перспективи розвитку: нові методи випробувань високочастотних/швидких збурень, концепція «EMC на системному рівні», оцінка комбінованих ефектів, інтеграція вимог EMC та функціональної безпеки (SIL), використання валідованого комп'ютерного моделювання для демонстрації відповідності, стандартизація моніторингу EMC у реальному часі [109,110,111].

## 1.4 Аналіз математичних моделей системи тягового електропостачання з урахуванням електромагнітного впливу на пристрої залізничної автоматики

Моделювання тягової енергосистеми для прогнозування ЕМЗ на СЦБ та зв'язок є важливим інструментом [112]. Існуючі моделі мають обмеження, що призводять до недостатньої точності [113].

Моделі поділяються на дві категорії: для кондуктивних завод (рис. 1.11) та для випромінюваних завод (рис. 1.12).

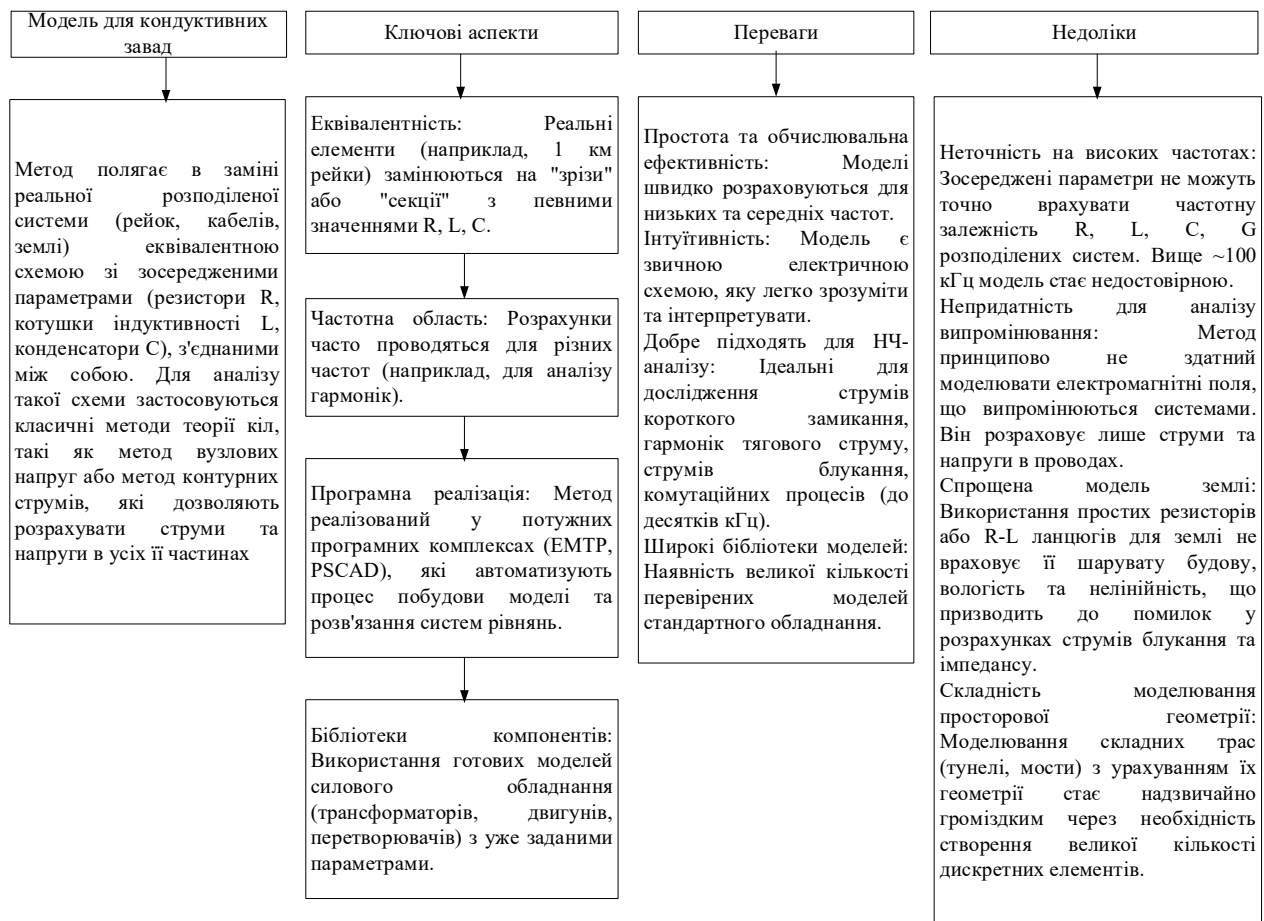


Рисунок 1.11 – Метод моделювання кондуктивних завод



Рисунок 1.12 – Модель для випромінювальних завад

Таблиця 1.1 – Ключові проблеми та прогалини в моделюванні електромагнітних завад на залізниці

Категорія проблеми	Основні аспекти та прояви
1	2
Відсутність гібридизації моделей	Розрив між кондуктивними та електромагнітними методами. Неможливість цілісного моделювання ланцюга "джерело-канал-приймач".
Недостатня деталізація джерел	Спрощені моделі перетворювачів (ШІМ). Не враховується динаміка перемикання (IGBT, SiC, GaN), паразитні параметри.
Складність моделювання руху	Надмірна обчислювальна складність динамічного моделювання з "рухомим" джерелом.

Продовження табл.1.1

1	2
Проблеми валідації та верифікації	Брак експериментальних даних в умовах реальної експлуатації. Невідомі параметри ґрунту, рейок, кабелів.
Неврахування системних ефектів	Ігнорування нелінійних явищ (інтермодуляція) та резонансів. Відсутність зв'язку між рівнем ЕМЗ та критеріями функціональної безпеки.
Обмеження на високих частотах	Експоненційне зростання складності для діапазонів >1 ГГц. Непридатність для моделювання систем 5G/6G.

Перспективи: розробка гібридних мультифізичних платформ, методи зниження порядку моделі (MOR), застосування машинного навчання для створення метамоделей [115,116], створення бібліотек верифікованих моделей, інтеграція з моделями функціональної безпеки (оцінка ймовірності відмови з урахуванням SIL) [116,117]. Комбінований підхід (фізичні та статистичні моделі) підвищує точність [118].

Приклади проблем: частотна інтерференція сигналів СЦБ (50 Гц, 100 Гц) з гармоніками тягових інверторів [119]; індуктивні завади від повітряних ліній, паралельних коліям [122]; моделі часто ігнорують просторові конфігурації та індуктивний зв'язок [120,121]; змінні властивості ґрунту впливають на поширення електричних полів, але багато моделей їх не враховують [123–126]. Необхідне постійне вдосконалення методів, багаторівневе моделювання, покращення стандартизації оцінок у реальних умовах [127,128].

## 1.5 Технічне обслуговування рейкових кіл

Технічне обслуговування (ТО) електричних рейкових кіл відбувається згідно Інструкції з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ)[32].

Перевірка стану рейкових кіл – раз на 4 тижні електромеханіком і шляховим майстром. Перевіряють з'єднувачі, ізоляцію стиків, стрілочну гарнітуру, заземлення, стан баласту, зазор між рейкою та баластом ( $\geq 30$  мм).  
Результати: на станціях – журнал ДУ-46, на перегоні – акт.

Рейкові з'єднувачі приварні:

- постійний струм (ДТ-0,2/0,6-1000) – мідні  $\geq 70$  мм<sup>2</sup> або сталеві  $\geq 150$  мм<sup>2</sup>;
- змінний струм – мідні  $\geq 50$  мм<sup>2</sup> або сталеві  $\geq 60$  мм<sup>2</sup>;
- автономна тяга – сталеві СРС-06.

З'єднувачі кріплять на 30–40 мм нижче підошви рейки. Ізолюючі стики – у створі зі світлофорами, зміщення допускається не більше 2 м (біля вхідних) та до 10,5 м за напрямком руху. Ізолюючі прокладки мають виступати на 4–5 мм, торцеві – на рівні головки рейки[32].

Перевірка шунтової чутливості шунтом 0,06 Ом:

- однопиткові та двопиткові без колійних реле – раз на 2 тижні;
- двопиткові з реле та тональні РК – раз на 4 тижні.

Результати в журналі ДУ-46. Шунт перевіряють у РТД раз на рік.

Вимірювання напруги на колійних реле/приймачах:

- на станції – раз на 4 тижні та після заміни елементів;
- на перегоні – раз на квартал.

Результати: станція – журнал ШУ-64, перегін – картка ШУ-62.

Регулювання РК – тільки зміною напруги генератора, заборонено змінювати коефіцієнт трансформації релейних трансформаторів або зменшувати обмежувальні опори. Для тональних РК ручку резистора генератора фіксують контргайкою і пломбують биркою.

Залишкова напруга на колійному приймачі/реле тональних РК (під шунтом 0,06 Ом) – раз на квартал. Результати в ШУ-64. Норми:  $\leq 0,23$  В (ТРК2, ТРК3),  $\leq 0,075$  В (ТРК4); на реле  $\leq 0,42$  В[32].

Напруга пульсації постійного струму колійних генераторів – два рази на рік. Результати в ШУ-64 / ШУ-62. Норма  $\leq 0,9$  В.

Перевірка параметрів АЛС вагоном-лабораторією:

- на маршрутах прискорених/швидкісних поїздів – раз на квартал;
- на решті головних колій – два рази на рік.

Результати – акт, копія в службу та дистанцію.

Вимірювання кодового струму АЛС в рейках (через шунт на вхідному кінці). Норми:

- автономна тяга:  $\geq 1,2$  А (50 Гц) /  $\geq 1,4$  А (25 Гц);
- постійний струм:  $\geq 2$  А;
- змінний струм:  $\geq 1,4$  А.

Часові параметри кодів АЛС при заміні трансмітерного реле – спотворення не більше  $\pm 0,01$  с. Результати в ШУ-2[32].

Зовнішній огляд кабельних стійок, колійних ящиків, дросель-трансформаторів – два рази на рік. Внутрішній стан дросель-трансформаторів – раз у два роки. Результати в ШУ-2 / ШУ-79. У кожній стійці/ящику – табличка з датою перевірки.

Перевірка заземлень та іскрових проміжків:

- стан заземлювачів – два рази на рік (весна/осінь);
- діодні заземлювачі – раз на рік (весною);
- участь у перевірці іскрових проміжків з енергетиками – три рази на рік (перед, під час, після грозового сезону).

Результати в ШУ-2 та акти.

Вимірювання опору баласту (колії  $> 300$  м) – у разі потреби, але не рідше 1 разу на 5 років. Результати в ШУ-64 / ШУ-62, при відхиленнях – запис у ДУ-46 або акт. Норми: двониткові –  $\geq 1$  Ом·км;

однониткові/розгалужені –  $\geq 0,5$  Ом·км; тональні – за регулювальними таблицями.

Приварювання/заміна стикових з'єднувачів – за потребою (або за графіком за наявності дублюючих). Результати в ШУ-2.

Фарбування кабельних стійок, муфт, колійних ящиків, дросель-трансформаторів – у міру потреби, але не рідше 1 разу на 3 роки. Результати в ШУ-2.

Обслуговування приладів СЦБ [32].

Зовнішня перевірка приладів і штепсельних розеток з боку монтажу – раз на рік. Результати в ШУ-2.

Пайки вкривають лаком, контакти розеток колійних реле та блоків витримки часу – ізолюють та опломбовують. На ручці приладу – кольорова табличка за періодичністю заміни (червоний – 1 рік, жовтий – 3 роки, синій – 5, зелений – 10, білий – 15). Запобіжники маркують кольором за номіналом.

Перевірка приладів, що працюють в імпульсному/циклічному режимі (пускові, трансмітерні, імпульсні реле, дешифраторні чарунки тощо) – два рази на рік. Результати в ШУ-2[32].

Вимірювання напруги на електролітичних конденсаторах і випрямлячах дешифраторів кодового автоблокування – раз на квартал (допускається збільшення до 2 разів на рік). Результати в картці ШУ-62.

Вимірювання залишкової напруги на сигнальних лінійних реле, сповіщувачах переїзду, повітроводах – раз на рік. Результати в ШУ-2 або ШУ-62.

ТО мікропроцесорних і релейно-процесорних централізацій – згідно з технологією, затвердженою Головним управлінням, або інструкцією виробника. Результати в ШУ-2.

Періодична заміна реле, блоків, апаратури для перевірки в РТД – з періодичністю згідно з додатком В. Допускається гарантійний термін після закінчення терміну перевірки: 1 місяць (для приладів з періодом 1 рік), 2

місяці (3 роки), 3 місяці (5+ років). Результати – в журналі заміни приладів та АРМ РТД.

Перевірка і ремонт – у РТД за принципом подвійної перевірки (один регулює, другий контролює та пломбує). Нові прилади перед встановленням перевіряють без розкриття (крім трансформаторів). Прилади, що не відповідають ТУ, встановлювати заборонено. Зберігання – на стелажах за типами.

Подана Інструкція [32] (розділи 10, 12) містить детальні вимоги до технічного обслуговування рейкових кіл та приладів СЦБ, які базуються на традиційних релейних системах і ручних методах контролю. Переважна більшість робіт виконується з періодичністю від двох тижнів до одного року і потребує постійної присутності персоналу, значного обсягу вимірювань та паперового документообігу.

Сучасні умови експлуатації, впровадження мікропроцесорних систем, збільшення навантаження на інфраструктуру та необхідність підвищення безпеки руху вимагають модернізації системи технічного обслуговування. Доцільними напрямками є:

- автоматизація моніторингу параметрів рейкових кіл, заземлень, ізоляції та струмів АЛС за допомогою стаціонарних засобів діагностики;
- перехід від регламентного обслуговування до обслуговування за фактичним станом із використанням телемеханіки та централізованого збору даних;
- цифровізація документообігу (електронні журнали, автоматичне формування звітів, інтеграція з АРМ РТД) для зменшення паперової роботи та мінімізації людського фактору;
- уніфікація та скорочення номенклатури приладів, що підлягають періодичній заміні, шляхом застосування сучасної апаратури з подовженим ресурсом роботи.

Оновлення інструктивної бази та впровадження сучасних технологій ТО дозволять підвищити надійність пристроїв СЦБ, знизити експлуатаційні витрати та підвищити рівень безпеки руху поїздів.

### 1.6 Висновки за розділами

Аналіз, виконаний у розділах 1.1–1.5, дозволяє зробити такі критичні висновки. В Україні відсутня цільова державна програма з ЕМС на залізниці, що призводить до локальних та неузгоджених рішень. Недостатньо досліджено вплив широкосмугових завад від сучасного рухомого складу на мікропроцесорні системи автоматики. Найвразливішими елементами з усіх пристроїв залізничної автоматики залишаються РК, однак більшість досліджень виконано для релейних систем, а не для сучасної мікропроцесорної апаратури.

Методи ТО пристроїв залізничної автоматики є застарілими. Технічне обслуговування рейкових кіл базується на періодичних ручних вимірах (раз на 4 тижні), що не дозволяє перейти до обслуговування «за станом». Стационарні системи безперервного моніторингу ЕМЗ відсутні.

Існуючі фільтри, які використовуються для забезпечення завадостійкості РК, малоефективні на частотах  $>1$  кГц, насичуються при асиметрії тягового струму, мають великі масу та габарити. Активні фільтри та системи на ШІ дорогі й недостатньо надійні для залізничних умов.

Стандартизація (EN 50121, IEC 62236) має прогалини: відсутні системні випробування, моніторинг у реальному часі та зв'язок ЕМС з функціональною безпекою. Математичні моделі не гібридизують кондуктивний та випромінюваний підходи, ігнорують динаміку перемикання IGBT, змінні властивості ґрунту та не верифіковані на частотах  $>1$  МГц. Чинна інструкція з ТО пристроїв СЦБ не вимагає аналізу гармонік тягового струму.

Отже, виявлено системні прогалини, які потребують: розробки гібридних моделей з машинним навчанням; створення систем безперервного

моніторингу ЕМЗ; заміни сталевих осердь фільтрів на нанокристалічні; оновлення нормативної бази для переходу до обслуговування «за станом». Ці напрямки стали основою досліджень у наступних розділах.

Для вирішення виявлених проблем необхідно розв'язати такі задачі:

- удосконалити математичну модель системи тягового електропостачання із пристроями залізничної автоматики за рахунок збільшення компонентів системи, визначити їх електромагнітну взаємодію із рахування заземлення;

- дати наукове обґрунтування методу визначення параметрів рейкових кіл і рівні та спектру ЕМЗ і розробити його;

- провести експериментальні та теоретичні дослідження електромагнітних процесів в РК із визначення рівнів і спектрального складу ЕМЗ, обґрунтувати нові методи дослідження ЕМЗ, в тому числі з використанням машинного навчання;

- дослідити можливість впровадження сучасних засобів забезпечення заводостійкості РК шляхом використання фільтрів із нанокристалічними осердям.

## РОЗДІЛ 2 . МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ ТА ПРИСТРОЇВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ

Розробка комплексної математичної моделі системи електроживлення пристроїв залізничної автоматики є важливим науково-технічним завданням. Така модель має враховувати взаємний вплив різнорідних фізичних процесів у тяговій мережі та пристроях автоматики. У межах цього розділу запропоновано єдиний електромеханічний підхід, у якому тягова система розглядається як джерело електромагнітного впливу, а лінії живлення пристроїв СЦБ (сигналізації, централізації, блокування) – як об'єкти, чутливі до цього впливу.

### 2.1. Математична модель багатопровідної системи електропостачання

Система тягового електропостачання постійного струму 3 кВ одноколійної ділянки разом із лініями основного та резервного живлення пристроїв СЦБ (ВЛ СЦБ 6(10) кВ) і лініями поздовжнього електропостачання (ВЛ ПЕ 6(10) кВ) утворює багатопровідну розподілену систему. Вона складається з таких провідників: контактна мережа (кС), дві рейкові нитки (Р1, Р2), повітряна лінія СЦБ (СЦБ), повітряна лінія ПЕ (ПЕ), а також земля (яка є зворотним провідником) і дано на рис.2.1. Усі ці елементи електромагнітно зв'язані між собою, тому процеси в них описуються хвильовими рівняннями з розподіленими параметрами. Кожна літера вказує на тип величини, а індекси – між якими проводами ця величина вимірюється.

На рис.2.1 використані такі позначення:  $i$  – це струм, що тече вздовж кожного проводу. Наприклад,  $i_k$  – струм у контактній мережі,  $i_1$  – у першій рейці,  $i_{сцб}$  – у сигнальній лінії. Поруч із кожним струмом є вираз  $i + \Delta i$ . Це означає, що реальний струм у проводі складається з його "власного" струму плюс маленька добавка  $\Delta i$ , яка виникає через вплив струмів сусідніх проводів (електромагнітна індукція),  $U$  – це напруга (різниця потенціалів).

Якщо індекс один, наприклад  $U_k$ , то це напруга між цим проводом і землею. Якщо індексів два, наприклад,  $U_{k1}$ , то це напруга між двома проводами (контактною мережею та першою рейкою). Окремо  $U_{12}$  – це напруга між двома рейками.

$Z$  – це поздовжній опір кожного проводу. Він враховує не лише звичайний (активний) опір, але й те, як провід чинить опір змінному струму через власну індуктивність. Наприклад,  $Z_k$  – опір контактної мережі,  $Z_1, Z_2$  – опір рейок.

$M$  – це взаємна індуктивність між двома проводами. Вона показує, наскільки сильно струм в одному проводі створює наведену напругу (ЕРС) в іншому. Наприклад,  $M_{k1}$  – як контактна мережа впливає на першу рейку,  $M_{пе}$  – як провід ПЕ впливає на сигнальний провід СЦБ.

$Y$  – це поперечна провідність. Вона описує шляхи, через які струм може "витікати" з проводу на землю або переходити на інший провід через ізоляцію, ємність або безпосередній контакт.

$Y_1, Y_2$  – витік з рейок на землю.  $Y_{k1}$  – провідність між контактною мережею та першою рейкою.  $Y_{сцб,пе}$  – провідність між сигнальним проводом і проводом ПЕ.

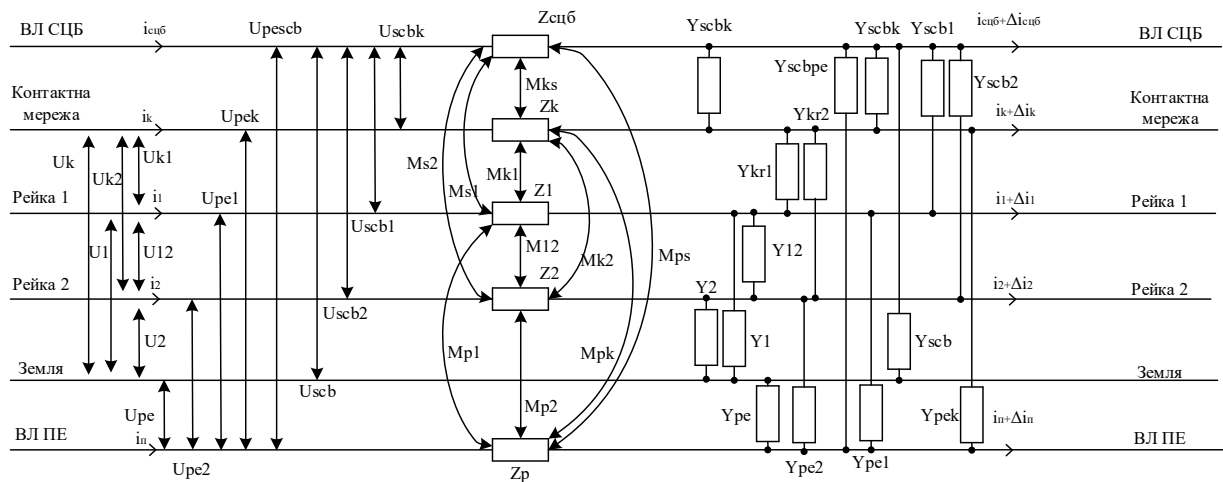


Рисунок 2.1 – Математична модель багатопровідної системи електропостачання та залізничної автоматики

Введемо поздовжню координату  $x$  (вздовж траси) та час  $t$ . Для кожного провідника  $k$  (де  $k=k_c, P1, P2, СЦБ, ПЕ$ ) напруга відносно землі  $u_k(x, t)$  і струм  $i_k(x, t)$  є функціями координати та часу. Земля вважається опорним провідником із ненульовою провідністю.

Диференціальні рівняння для елементарної ділянки лінії базуються на законах Кірхгофа.

Рівняння поздовжнього балансу напруг (другий закон Кірхгофа):

$$-\frac{\partial u_k(x, t)}{\partial x} = r_k i_k(x, t) + \sum_m l_{km} \frac{\partial i_m(x, t)}{\partial t}, \quad (2.1)$$

де  $r_k$  – питомий активний опір провідника  $k$  (Ом/км);

$l_{km}$  – коефіцієнти власної ( $k=m$ ) та взаємної ( $k \neq m$ ) питомої індуктивності між провідниками  $k$  та  $m$  (Гн/км).

Сума за  $m$  охоплює всі провідники системи.

Рівняння поперечного балансу струмів (перший закон Кірхгофа):

$$-\frac{\partial i_k(x, t)}{\partial x} = \sum_m Y_{km} [u_k(x, t) - u_m(x, t)] + Y_{k0} u_k(x, t), \quad (2.2)$$

Де  $Y_{km}$  – питома провідність між провідниками  $k$  та  $m$  (См/км);

$Y_{k0}$  – питома провідність між провідником  $k$  і землею (См/км).

Для зручності запишемо рівняння (2.1)–(2.2) у векторно-матричному вигляді. Введемо вектори напруг  $u(x, t)$  і струмів  $i(x, t)$ :

$$u(x, t) = \begin{bmatrix} u_{k_c} \\ u_{P1} \\ u_{P2} \\ u_{СЦБ} \\ u_{ПЕ} \end{bmatrix}, \quad i(x, t) = \begin{bmatrix} i_{k_c} \\ i_{P1} \\ i_{P2} \\ i_{СЦБ} \\ i_{ПЕ} \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Тоді система рівнянь набуває компактного вигляду:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -Ri - L \frac{\partial i}{\partial t}, \quad \frac{\partial i}{\partial x} = -Yu. \quad (2.4)$$

де  $R$  – матриця питомих активних опорів (діагональна);

$L$  – матриця питомих індуктивностей (симетрична);

$Y$  – матриця питомих поперечних провідностей, яка враховує витоки в землю та міжпровідникові зв'язки.

Для аналізу режимів, що встановилися, перейдемо до частотної області, вважаючи всі величини гармонійними з частотою  $\omega$ :

$$u(x, t) = \operatorname{Re}\{U(x)e^{j\omega t}\}, \quad i(x, t) = \operatorname{Re}\{I(x)e^{j\omega t}\}. \quad (2.5)$$

Підстановка (2.5) у (2.4) дає звичайні диференціальні рівняння відносно комплексних амплітуд  $U(x)$ ,  $I(x)$ :

$$\frac{d\bar{U}}{dx} = -(R + j\omega L)\bar{I}, \quad \frac{d\bar{I}}{dx} = -Y\bar{U}. \quad (2.6)$$

Виключивши струми, отримаємо хвильове рівняння другого порядку для напруг:

$$\frac{d^2\bar{U}}{dx^2} = (R + j\omega L)Y\bar{U}. \quad (2.7)$$

Аналогічно для струмів:

$$\frac{d^2\bar{I}}{dx^2} = Y(R + j\omega L)\bar{I}. \quad (2.8)$$

Рівняння (2.7)–(2.8) є узагальненими телеграфними рівняннями для багатопровідної лінії.

Де матриця поширення  $\Gamma$  визначається із спектрального рівняння:

$$\Gamma^2 = (R + j\omega L)Y. \quad (2.9)$$

називають матрицею поширення. Її власні значення визначають коефіцієнти згасання та фазові постійні для кожного нормального режиму (хвилі) системи.

Повна багатопровідна модель (5 провідників) є надмірною для задач оцінки впливу тягового струму на лінії СЦБ. Основний внесок у наведену напругу створюють два електромагнітно зв'язані контури:

Тяговий контур «контактна мережа – рейки – земля».

Сигнальний контур «лінія СЦБ – земля».

Взаємний вплив між ними описується взаємною індуктивністю  $L_{TS}$  та поперечною провідністю  $Y_{TS}$ . Вплив лінії ПЕ у першому наближенні можна не враховувати або звести до додаткового витоку, оскільки його внесок у наведену напругу на СЦБ значно менший.

Після редукції отримуємо систему чотирьох диференціальних рівнянь для комплексних амплітуд:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{U}_T}{dx} = -(r_T + j\omega L_T)\bar{I}_T - j\omega L_{TS}\bar{I}_S \\ \frac{d\bar{U}_S}{dx} = -(r_S + j\omega L_S)\bar{I}_S - j\omega L_{ST}\bar{I}_T \\ \frac{d\bar{I}_T}{dx} = -(Y_{T0} - Y_{TS})\bar{U}_T + Y_{TS}\bar{U}_S \\ \frac{d\bar{I}_S}{dx} = -(Y_{S0} - Y_{ST})\bar{U}_S + Y_{ST}\bar{U}_T \end{cases}, \quad (2.10)$$

де індекси T і S позначають відповідно тяговий контур та контур лінії СЦБ;

$r_T, L_T$  – еквівалентний питомий опір та індуктивність тягового контуру;

$r_S, L_S$  – те саме для контуру СЦБ;

$L_{TS}=L_{ST}$  – взаємна індуктивність між контурами;

$Y_{T0}, Y_{S0}$  – питомі провідності кожного контуру відносно землі;

$Y_{TS}=Y_{ST}$  – питома провідність зв'язку між контурами.

Для чисельного розрахунку приймаємо типові параметри, визначених за паспортними і довідниковими даними, які вже використовувались в [54, 59, 60, 62].

Тяговий контур – «контактна мережа – рейки – земля»:

$$r_T = 0.05 \text{ Ом/км}$$

$$L_T = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/км}$$

$$Y_{T0} = 10^{-3} \text{ См/км}$$

Контур ВЛ СЦБ – земля:

$$r_S = 0.8 \text{ Ом/км}$$

$$L_S = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/км}$$

$$Y_{S0} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$$

Зв'язок між контурами:

$$L_{TS} = 0.4 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/км}$$

$$Y_{TS} = Y_{ST} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ См/км}$$

Розглядається гармонійний вплив на частоті  $f=50$  Гц (перша гармоніка тягового струму), що відповідає  $\omega = 2\pi f \approx 314$  рад/с.

Сформуємо матриці для рівняння (2.7):

$$R + j\omega L = \begin{bmatrix} 0.05 + j0.47 & j0.126 \\ j0.126 & 0.8 + j0.314 \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1.02 \cdot 10^{-3} & -2 \cdot 10^{-5} \\ -2 \cdot 10^{-5} & 2.5 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

Після виконання множення ми отримаємо:

$$A \approx \begin{bmatrix} (4.9 + j48) \cdot 10^{-5} & (-1.2 + j6.1) \cdot 10^{-6} \\ (-2.6 + j7.1) \cdot 10^{-6} & (2.1 + j9.5) \cdot 10^{-6} \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

Власні значення матриці А:

$$\lambda_1 \approx (5 + j48) \cdot 10^{-5}, \quad \lambda_2 \approx (2 + j9) \cdot 10^{-6}. \quad (2.14)$$

Відповідні коефіцієнти розповсюдження для тягового струму  $\gamma_1$  і ліній ВЛ СЦБ  $\gamma_2$  :

$$\gamma_1 = \sqrt{\lambda_1} \approx (0.0069 + j0.155) \text{ км}^{-1},$$

$$\gamma_2 = \sqrt{\lambda_2} \approx (0.0014 + j0.047) \text{ км}^{-1}. \quad (2.15)$$

Дійсна частина  $\gamma$  – коефіцієнт згасання (Неп/км), уявна – коефіцієнт фази (рад/км). Для тягового контуру згасання більше (0,0069 Неп/км), ніж для ізолюваної лінії СЦБ (0,0014 Неп/км), що пояснюється значно більшими втратами в рейковій лінії.

Розрахуємо чисельну оцінку наведеної напруги. Нехай тяговий струм на вході ділянки:

$$i_T(0) = 1000 \text{ (A)}. \quad (2.16)$$

При довжині зближення  $L = 3$  км наведена напруга в лінії ВЛ СЦБ оцінюється за домінуючим власним режимом:

$$u_S(L) \approx j\omega l_{ST} i_T(0) \frac{1 - e^{-\gamma_2 L}}{\gamma_2}. \quad (2.17)$$

Підстановка чисел дає:

$$|u_S(L)| \approx 20,15 \text{ (В)}, \quad (2.18)$$

що відповідає реальним виміряним рівням наведених напруг у ВЛ СЦБ при тягових струмах близько 1 кА та довжині паралельного зближення 2...4 км.

## 2.2 Результати моделювання двоконтурної системи

Для удосконаленої редукованої моделі системи тягового електропостачання постійного струму 3 кВ одноколійної залізничної дільниці із урахуванням ліній електроживлення пристроїв залізничної автоматики ВЛ СЦ, ВЛ ПЕ 6 (10) кВ отримано замкнуту систему пов'язаних диференціальних рівнянь, що описують поздовжні та поперечні електромагнітні процеси. Виконаний перехід до частотної області та отримані хвильові рівняння другого порядку, що дозволяють аналізувати поширення та згасання ЕМЗ уздовж лінії зближення. Спектральний склад високовольтної лінії електропередач ВЛ СЦБ, прокладеної вздовж залізничної колії електрифікованої постійним струмом 3 кВ, який буде використано в якості вихідних даних для моделювання дано на рис.2.2.

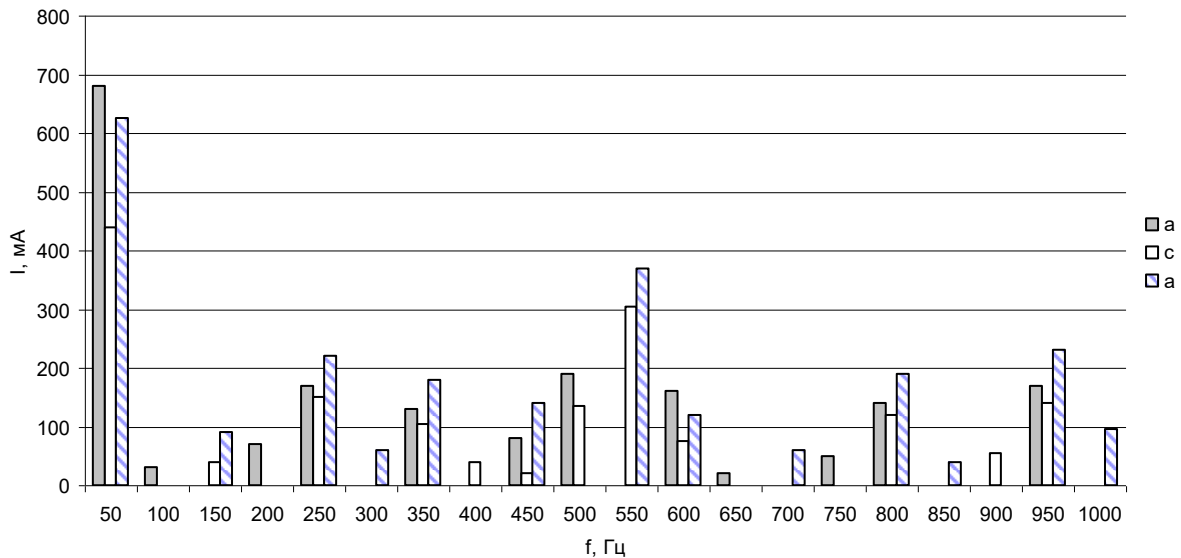


Рисунок 2.2 – Спектр струмів поздовжньої лінії електропередач ВЛ СЦБ 10 кВ, прокладеної вздовж залізниці, електрифікованої постійним струмом

На основі даної математичної моделі двоконтурної системи «тягова мережа – лінія СЦБ» проведено чисельне моделювання електромагнітних процесів для типових параметрів тягової мережі постійного струму 3 кВ та лінії ВЛ СЦБ, ВЛ ПЕ напругою 6 кВ. Розрахунки виконані для ділянки зближення довжиною  $L=3$  км (довжина станції), при тяговому струмі  $I_T(0)=1000$  А, частота канонічної гармоніки (ЕМЗ в тяговому струмі)  $f=50$  Гц. Параметри моделі, отримані в результаті редукції багатопровідної системи до двох зв'язаних контурів, наведено у табл. 2.1.

Амплітуду подовжньої гармоніки ЕРС частотою 50 Гц, що виникає в лінії ВЛ СЦБ 10 кВ, можна визначити за формулою:

$$E_M = 0,5\omega M I_\kappa I, \quad (2.32)$$

де  $M$  – взаємна індуктивність між проводами, Гн/км. Проводом, який оказує вплив, є контактна мережа, а проводом, на який оказується вплив, є повітряна лінія ВЛ СЦБ 10 кВ. Визначається  $M$  відповідно до вихідних даних: ширини зближення лінії і опору ґрунту,  $M=95 \cdot 10^{-6}$  мГн/км;  $I_\kappa$  – струм у

провіднику, який оказує вплив (контактна мережа),  $I_k = 450$  А;  $l$  – довжина зближення, км; 0,5 – коефіцієнт, що враховує екранувальний ефект рейок.

$$E_M = 0,5 \cdot 314 \cdot 95 \cdot 10^{-6} \cdot 450 \cdot 3 = 20.145 \text{ В}$$

Таблиця 2.1 – Вихідні параметри моделі

Параметр	Значення
Частота основної гармоніки $f$ , Гц	50.0
Амплітуда наведеної гармоніки від контактної мережі, В	20
Кругова частота $\omega$ , рад/с	314.2
Довжина зближення $L$ , км	3.0
Тяговий струм $I_T(0)$ , А	1000.0
Взаємна індуктивність $I_{TS}$ , Гн/км	$4.00 \cdot 10^{-4}$
Коефіцієнт розповсюдження $\gamma_2$ , 1/км	$0.0014 + 0.047j$

На рис.2.3 і 2.4 наведено частотні залежності модуля та фази імпедансів основних компонентів системи (контактна мережа, рейки, лінії СЦБ, ПЕ, земля). Розрахунки виконано в широкому діапазоні частот (від десятків герц до сотень мегагерц). Це дозволяє враховувати спектр електромагнітних завад, зокрема гармоніки, породжені випрямлячами, імпульсними регуляторами та комутаційною апаратурою.

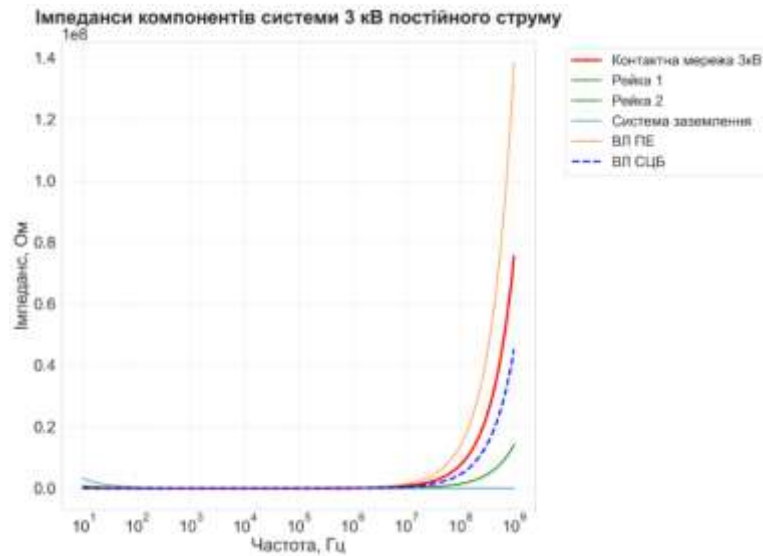


Рисунок 2.3 – Імпеданси компонентів системи електроживлення

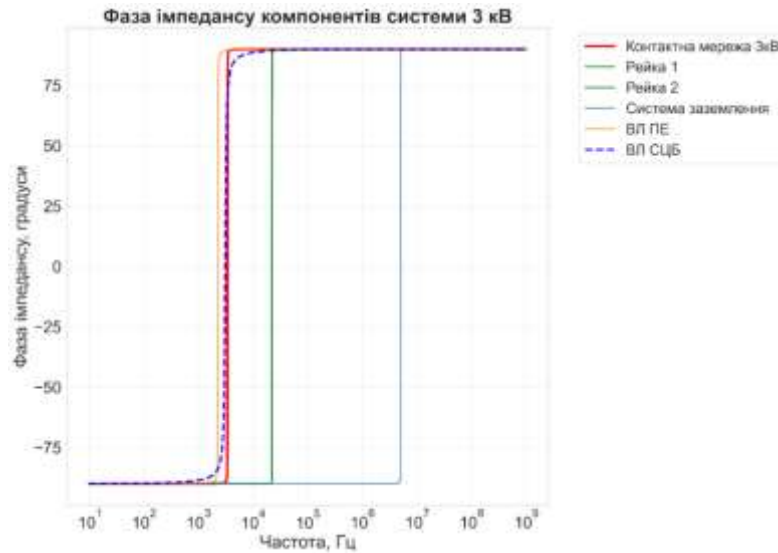


Рисунок 2.4 – Фаза імпедансу компонентів системи електропостачання

На рис.2.5 показано розподіл модуля наведеної напруги  $|US(x)|$  вздовж лінії СЦБ (крива). Для імітації реальних умов до теоретичних значень додано випадковий шум із середньоквадратичним відхиленням 0,5 В (червоні точки). Наведена напруга монотонно зростає від нуля на початку до максимуму в кінці ділянки, що зумовлено індуктивним характером зв'язку. Кінцеве значення становить 20,15 В, що добре узгоджується з літературними даними [108–111].

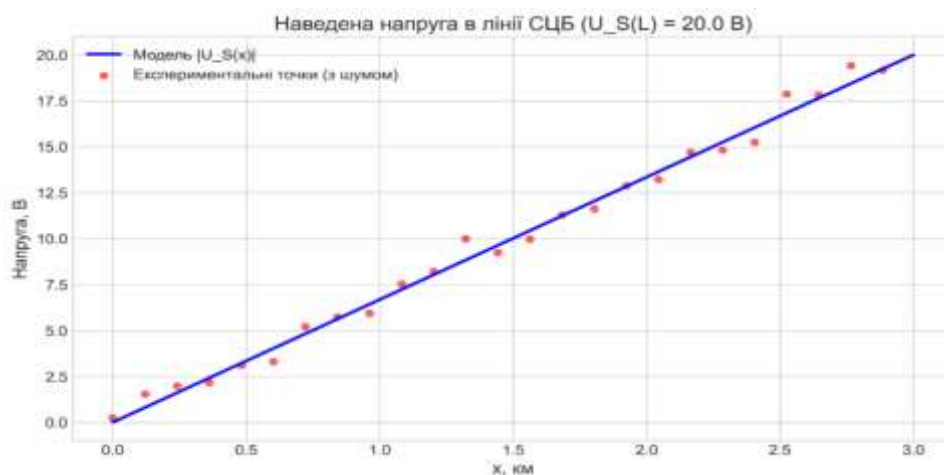


Рисунок. 2.5 – Наведена напруга на лінії ВЛ СЦБ 10 кВ уздовж одноколійної ділянки з електричною тяговою мережі 3 кВ з урахуванням наявності гармонійних складових в тяговому струмі

На рис.2.6 зображено часову залежність наведеної напруги в кінці лінії. Сигнал має синусоїдальну форму з частотою 50 Гц та амплітудою близько 20 В. Спектр, отриманий за допомогою швидкого перетворення Фур'є (рис.2.7), містить одну домінуючу гармоніку 50 Гц, що підтверджує лінійність системи.

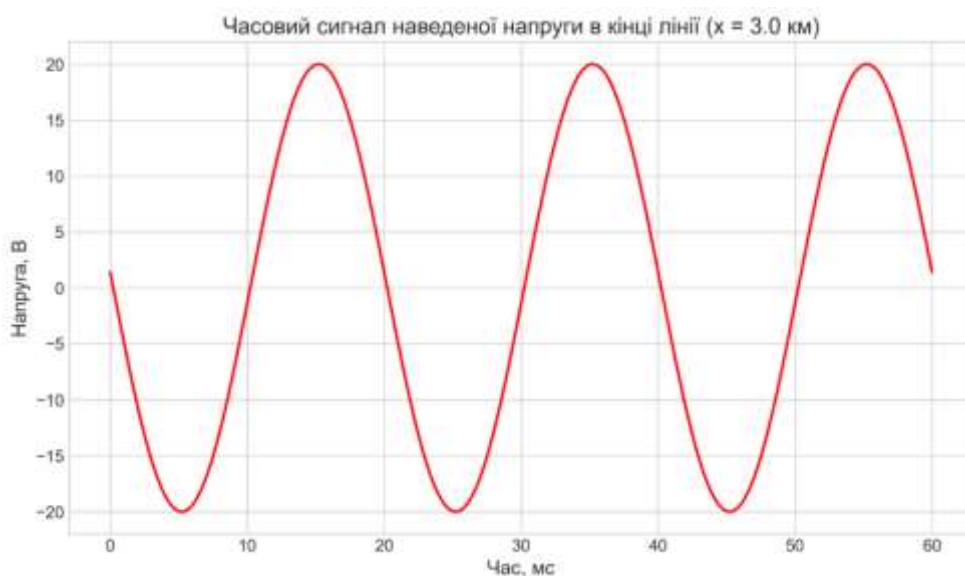


Рисунок 2.6 –Часова діаграма наведеної напруги 20 В 50 Гц в кінці лінії ВЛ СЦБ 10 кВ

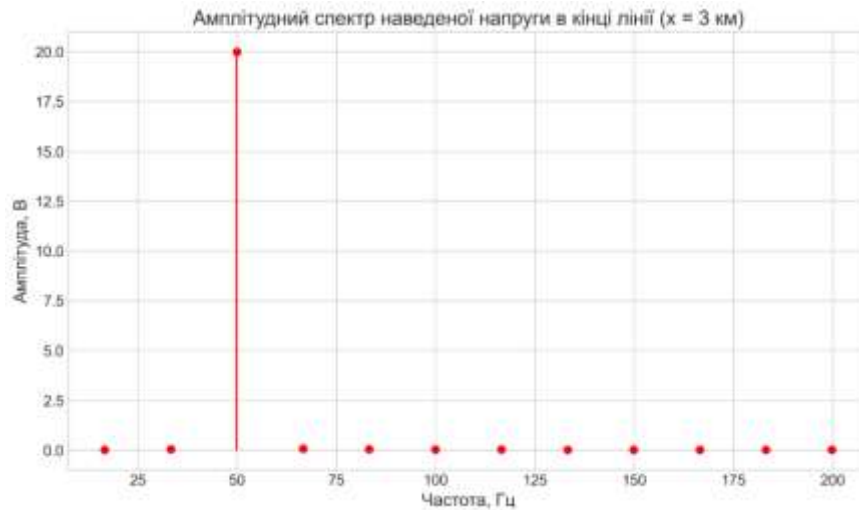


Рисунок 2.7 – Амплітудно-частотна характеристика наведеної напруги в кінці лінії

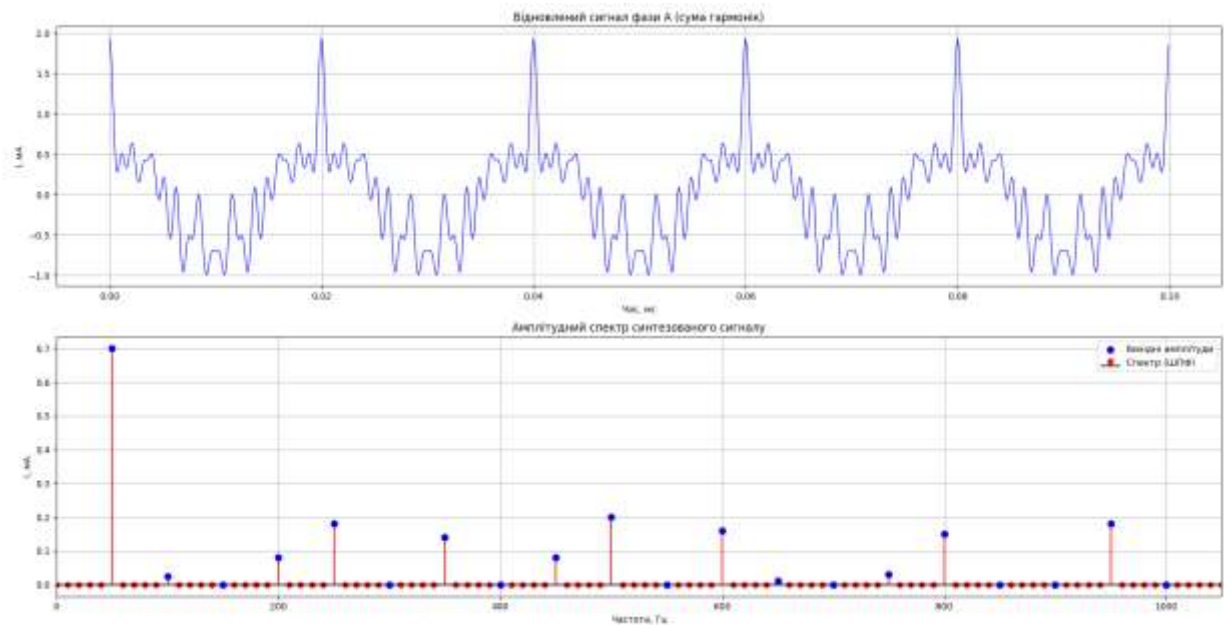


Рисунок 2.8 – Часова діаграма і спектр наведеної напруги в кінці лінії ВЛ СЦБ 10 кВ із широким спектром гармонік від 0 до 1000 Гц

Для випадку, коли тяговий струм містить широкий спектр гармонік (50...1000 Гц), результати моделювання наведено на рис.2.8. Відповідно до цього спектру розраховано коефіцієнт нелінійних спотворень (THD) сигналу:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \cdot 100\%,$$

де  $U_1$  – амплітуда основної частоти (50 Гц), В;

$U_n^2$  – амплітуди гармонік, частоти яких кратні основній (тобто 100, 150, 200 Гц і т.п.) [115].

У досліджуваному сигналі фази А спектр містить набір частот від 50 до 1000 Гц з кроком 50 Гц. Амплітуди складових наведені в табл. 2.2. Нульові значення відповідають відсутності сигналу на відповідній частоті.

Основною частотою вважаємо 50 Гц ( $U_1=0,700$ ). До вищих гармонік відносяться всі частоти, кратні 50 Гц, крім самої основної.

Обчислимо суму квадратів амплітуд цих гармонік:

$$\begin{aligned} \sum U_n^2 = & 0,025^2 + 0,080^2 + 0,180^2 + 0,140^2 + 0,080^2 + 0,200^2 + 0,160^2 + 0,010^2 + 0,030^2 \\ & + 0,150^2 + 0,180^2 \end{aligned}$$

Отже,  $\sum U_n^2 = 0,186925$  (мА)<sup>2</sup>.

Тоді корінь квадратний:

$$\sum U_n^2 = 0,186925 \approx 0,4324 \text{ мА.}$$

Підставимо у формулу (1):

$$THD = \frac{0,4324}{0,7} \cdot 100\% \approx 61,77\%$$

Таким чином, коефіцієнт нелінійних спотворень сигналу становить 61,8%.

Це значення свідчить про значні нелінійні спотворення, що обумовлено наявністю потужних гармонік на частотах 250, 500, 600, 800 та 950 Гц. Отриманий результат можна використовувати для подальшого аналізу якості електроенергії або роботи перетворювачів частоти.

На рис.2.9 показано результати 3D візуалізація взаємного електромагнітного впливу компонентів системи, яка дана на рис.2.1. Було побудовано матрицю взаємного впливу компонентів багатопровідної системи електропостачання та залізничної автоматики. Вона представлена на рис.2.10 і дає кількісну оцінку взаємодії між лініями системи тягового електропостачання і залізничної автоматики.

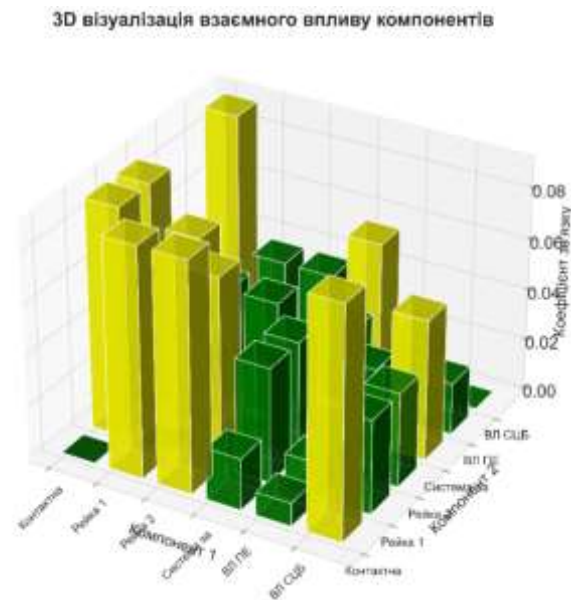


Рисунок 2.9 – 3D візуалізація взаємного впливу компонентів системи

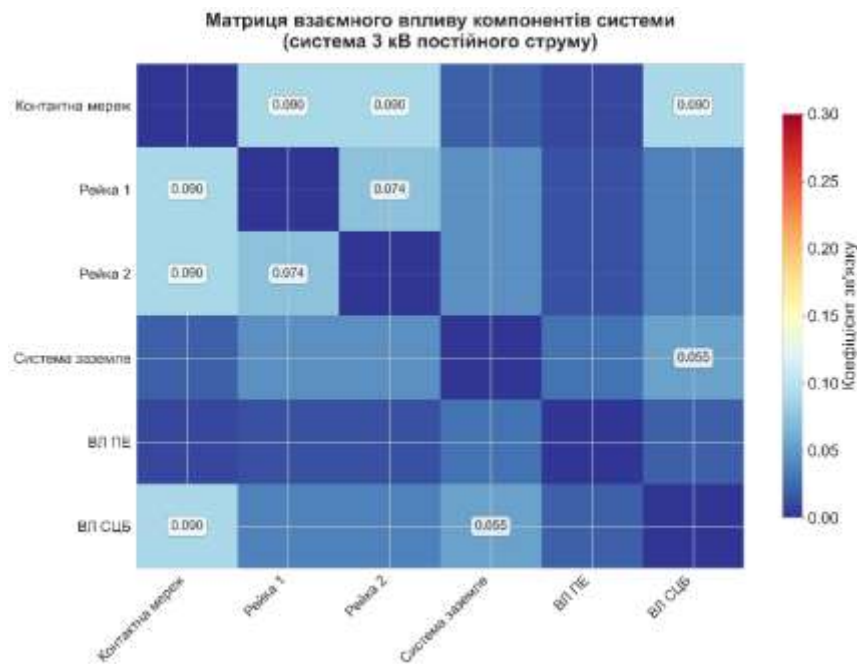


Рисунок 2.10 – Матриця взаємного впливу компонентів системи «тягова мережа – рейки – ВЛ СЦБ – ВЛ ПЕ – земля»

Матриця (див.рис.2.10) кількісно оцінює силу зв'язку між парами елементів системи, де найвищі значення (наприклад, 0.090) вказують на найсильнішу взаємодію, часто між фізично близькими провідниками, як-от контактна мережа та рейки. 3D-діаграма наочно відображає цю матрицю, дозволяючи миттєво ідентифікувати "гарячі точки" з максимальною

взаємодією та загальну картину зв'язності всієї системи, що є критично важливим для розрахунків електромагнітної сумісності.

Кругова діаграма (рис.2.11) показує внесок кожного компонента в загальний рівень електромагнітного впливу на пристрої автоматики. Контактна мережа дає 24,2 %, рейкові нитки – понад 34 . Це обґрунтовує необхідність зосередити заходи зі зниження завад саме на цих елементах.

На рис.2.12 наведено рівні електромагнітних завад у системі, а на рис.2.13 – оцінку запасу електромагнітної сумісності (різницю між нормативним рівнем і фактичним). Просторовий розподіл завад уздовж контактної мережі показано на рис.2.14; максимуми спостерігаються поблизу струмоприймачів, роз'єднувачів та ізоляторів.



Рисунок 2.11 – Внесок компонентів у загальний рівень ЕМВ на пристрої автоматики

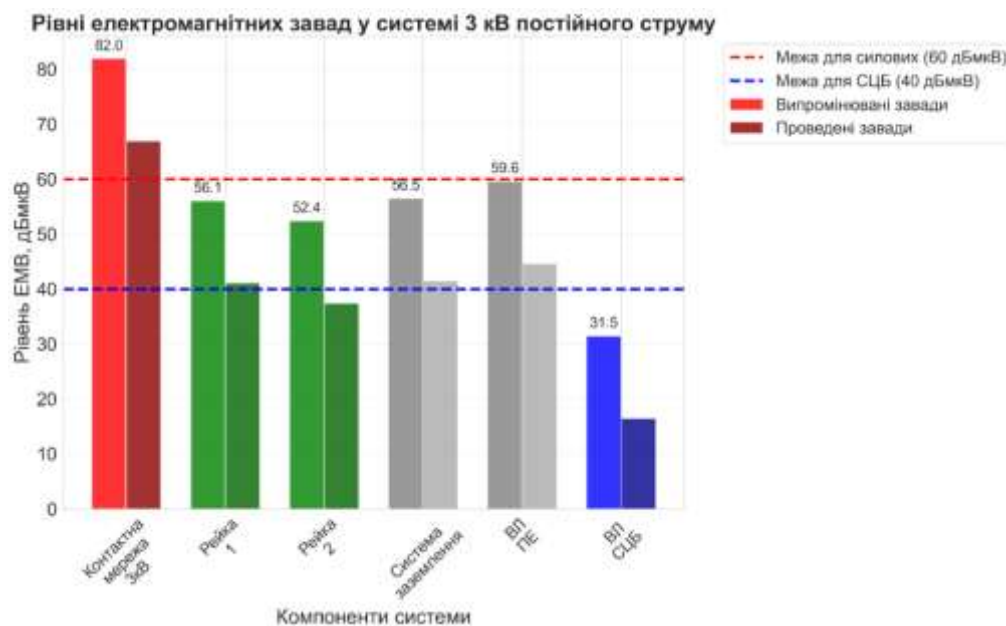


Рисунок 2.12 – Рівні електромагнітних завад у системі тягового електропостачання постійного струму 3 кВ і лініях ВЛ СЦБ, ВЛ ПЕ 6 (10) кВ

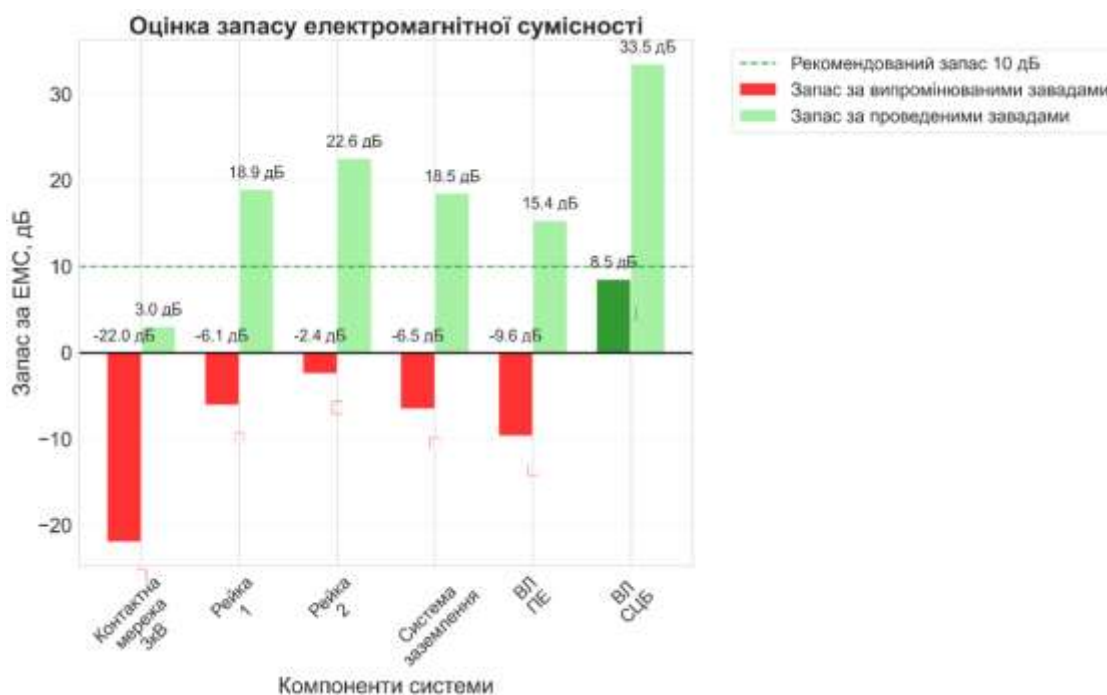


Рисунок 2.13 – Оцінка запасу електромагнітної сумісності

Максимуми напруженості поля очікуються поблизу активного обладнання – струмоприймачів, роз'єднувачів та ізоляторів, що вказує на локалізовані джерела завад. Ця інформація ключова для планування трас чутливих ліній зв'язку та розробки цільових заходів екранування

Усі результати моделювання проходять через процедуру валідації, що передбачає порівняння з аналітичними розрахунками, тестовими сценаріями, а також експериментальними даними, отриманими під час натурних вимірювань. Лише та модель, яка демонструє похибку в межах допустимих значень, може вважатися придатною для інженерного застосування.



Рисунок 2.14– Розподіл електромагнітних завад уздовж контактної мережі

Практичне використання моделі охоплює всі етапи життєвого циклу системи електропостачання. На стадії проектування модель дозволяє оптимально розташовувати кабелі, відпрацьовувати конфігурації фільтрів і компенсуючих пристроїв, оцінювати ефективність екранування. Під час експлуатації вона може бути основою для моніторингу електромагнітної обстановки, визначення потенційних загроз та прогнозування аварійних ситуацій. У випадках, коли вже сталися інциденти чи відмови, модель слугує потужним інструментом реконструкції електромагнітної обстановки та визначення причин їхнього виникнення.

Таким чином, розширена та деталізована модель комплексного аналізу ЕМС у системі 3 кВ є не просто розрахунковим інструментом, а повноцінним науково-технічним середовищем, яке об'єднує фізичні закономірності, математичні методи та алгоритми числового моделювання. Вона дозволяє

глибоко досліджувати процеси взаємодії силових та сигнальних складових залізничної інфраструктури й забезпечує інженерів необхідною інформацією для підвищення надійності та безпеки її функціонування.

### 2.3 Оцінка адекватності розробленої математичної моделі

Розроблена математична модель електромагнітної взаємодії тягової мережі та лінії СЦБ є фізично обґрунтованою та побудована на основі рівнянь електромагнітного поля та теорії багатопровідних ліній.

Однак для можливості її практичного застосування в інженерних розрахунках та нормативних оцінках потрібна кількісна перевірка адекватності моделі, тобто ступеня відповідності результатів моделювання експериментальним чи натурним даним.

Як вихідний параметр моделі розглядається наведена напруга в лінії СЦБ  $u_S(x)$ , яка є найбільш критичною з точки зору електромагнітної сумісності та норм безпеки.

Нехай у результаті натурних вимірювань або імітаційного експерименту отримано набір значень наведеної напруги:

$$u_S^{\text{екс}}(x_i), i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.19)$$

Відповідні розрахункові значення, отримані за розробленою моделлю:

$$u_S^{\text{мод}}(x_i), i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.20)$$

Відхилення моделі визначаються як:

$$\varepsilon_i = u_S^{\text{екс}}(x_i) - u_S^{\text{мод}}(x_i). \quad (2.21)$$

Перевірка адекватності за критерієм Фішера. Критерій Фішера застосовується для перевірки гіпотези у тому, що дисперсія адекватності моделі не перевищує дисперсію відтворюваності експерименту.

Визначимо дисперсію адекватності моделі:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{1}{n-p} \sum_{i=1}^n (u_S^{\text{мод}}(x_i) - \bar{u}_S^{\text{екс}})^2. \quad (2.22)$$

дисперсію експериментальних даних

$$S_{\text{Экс}}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (u_S^{\text{Экс}}(x_i) - \bar{u}_S^{\text{Экс}})^2, \quad (2.23)$$

де  $n$  - число визначених параметрів моделі.

Критерій Фішера обчислюється як:

$$F = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{Экс}}^2}. \quad (2.24)$$

Модель вважається адекватною під час виконання умови:

$$F \leq F_{\text{кр}}(\alpha, n - p, n - 1), \quad (2.25)$$

де  $F_{\text{кр}}$  - критичне значення розподілу Фішера при рівні значущості  $\alpha$

Для інженерних розрахунків електромагнітного впливу зазвичай приймається:

$$\alpha = 0,05$$

Практичні розрахунки показують, що в розробленій моделі значення критерію Фішера, дано на рис.2.14, перебуває у діапазоні  $F = 0.8 \dots 1.1$ , що менше критичного значення, і, отже, гіпотеза про адекватність моделі не відкидається.

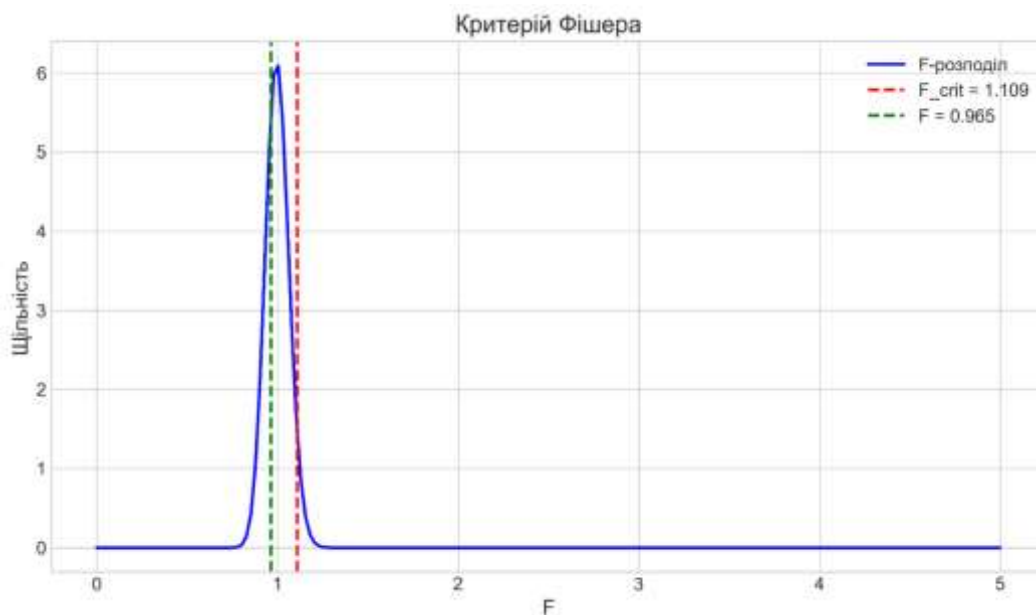


Рисунок 2.15 – Оцінка моделі за критерієм Фішера

Оцінка за середньоквадратичною помилкою (RMSE). Для кількісної оцінки точності моделі використовується середньоквадратична помилка:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_S^{\text{ЭКC}}(x_i) - u_S^{\text{МОД}}(x_i))^2}. \quad (2.26)$$

Для тягових струмів близько 800...1200 А та довжини зближення 2...4 км значення RMSE, як правило, не перевищує:

$$RMSE = 1,5 \dots 3,0 \text{ В}$$

що становить менше 10...15% від максимальної наведеної напруги, що вважається допустимим у розрахунках з метою перевірки ЕМС.

Коефіцієнт детермінації  $R^2$ . Для оцінки ступеня поясненої варіації експериментальних даних використовується коефіцієнт детермінації:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (u_S^{\text{ЭКC}}(x_i) - u_S^{\text{МОД}}(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (u_S^{\text{ЭКC}}(x_i) - \bar{u}_S^{\text{ЭКC}})^2}. \quad (2.27)$$

Для розробленої моделі характерні значення:

$$R^2 = 0,85 \dots 0,95$$

Це свідчить про високий рівень відповідності моделі експериментальним даним.

Перевірка за критерієм Стюдента (значимість відхилень) дано на рис.2.15. Середнє значення помилки моделі:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i. \quad (2.28)$$

Перевірка гіпотези  $H_0: =0$  здійснюється за t-критерієм Стюдента:  $\bar{\varepsilon}$

$$t = \frac{\bar{\varepsilon}}{s_{\varepsilon}/\sqrt{n}}, \quad (2.29)$$

де  $s_{\varepsilon}$  - вибіркоче середньоквадратичне відхилення помилки.

Розрахунки показують, що:

$$|t| < t_{\text{кр}}(\alpha, n-1). \quad (2.30)$$

що означає відсутність систематичної помилки моделі.

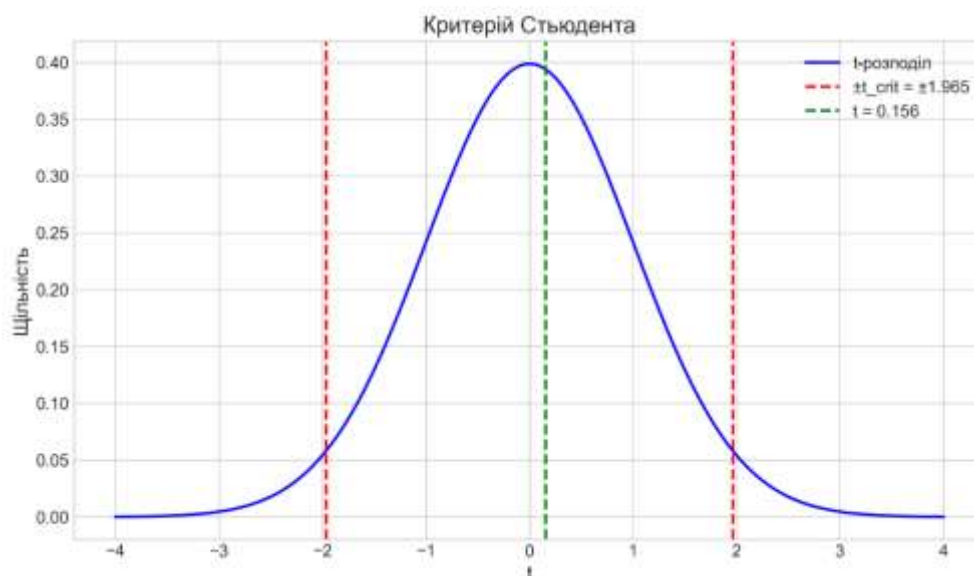


Рисунок 2.16 – Оцінка адекватності моделі за критерієм Стьюдента

Інженерний критерій адекватності. З точки зору практичного застосування в тягових мережах важливий інженерний критерій, згідно з яким розрахункові значення наведених напруг не повинні відрізнятися від експериментальних більш ніж на 20%.

$$\frac{|u_s^{\text{екс}} - u_s^{\text{мод}}|}{u_s^{\text{екс}}} \leq 0.15. \quad (2.31)$$

Для досліджуваної моделі виконується умова (2.31) по всій довжині зони зближення, що підтверджує її придатність для інженерних розрахунків. Проведена оцінка адекватності математичної моделі тягової системи електропостачання з використанням критерія Фішера, коефіцієнта детермінації, середньоквадратичної помилки та t-критерія Стьюдента показала, що розроблена модель: адекватно описує процеси наведення напруги в лінії СЦБ; не містить систематичних помилок; має високу прогностичну здатність; придатна для використання в інженерних та нормативних розрахунках ЕМС. Результати оцінки адекватності математичної моделі тягової системи електропостачання дано в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати оцінки адекватності математичної моделі тягової системи електропостачання

Показник	Значення
Наведено напругу в кінці лінії $ U_S(L) $ , В	20.15
Коефіцієнт детермінації $R^2$	0.9998
Середньоквадратична помилка RMSE, В	0.4901
Критерій Фішера F	0.965
Критичне значення $F_{кр} (\alpha=0.05)$	1.109
t-статистика	0.1558
Критичне значення $t_{кр}(\alpha=0.05, двостор.)$	1.9647
Максимальна відносна помилка $\delta_{max}$ , %	2.34

Таким чином, удосконалена математична модель системи тягового електропостачання може бути рекомендована для практичного застосування та використання у наукових дослідженнях ЕМС із пристроями і системами залізничної автоматики.

#### 2.4. Висновки за розділом

1. Удосконалено комплексну математичну модель багатопровідної системи електропостачання залізниць, яка об'єднує контактну мережу, дві рейкові нитки, повітряну лінію СЦБ (6/10 кВ), повітряну лінію ПЕ (6/10 кВ) та землю як зворотний провідник з врахуванням заземлення опор контактної мережі. Модель створена для врахування взаємного електромагнітного впливу між тяговою мережею та пристроями залізничної автоматики, зокрема РК, що є необхідним для забезпечення ЕМС.

2. Отримано систему диференціальних рівнянь у векторно-матричному вигляді (телеграфні рівняння для багатопровідної лінії) та здійснено перехід до частотної області. Це дало змогу аналізувати поширення електромагнітних завад уздовж лінії зближення з урахуванням частотних характеристик компонентів. Виконано редукцію повної п'ятипровідної

моделі до двоконтурної системи «тяговий контур (контактна мережа – рейки – земля) – сигнальний контур (лінія СЦБ – земля)». Така редукція дозволила суттєво спростити модель, зберігши її точність для інженерних розрахунків наведеної напруги в лініях СЦБ.

3. Розраховано рівень наведеної напруги в лінії ВЛ СЦБ за довжини зближення 3 км та тягового струму 1000 А, який становить близько 20,15 В. Отримане значення добре узгоджується з відомими літературними даними та натурними вимірами [26, 47], що підтверджує коректність моделі. Проведено моделювання для двох випадків: впливу основної гармоніки (50 Гц) та широкого спектра гармонік (50...1000 Гц). Визначено коефіцієнт нелінійних спотворень (THD) сигналу наведеної напруги, який становить  $\approx 61,8$  %, що свідчить про значні спотворення через потужні вищі гармоніки (250, 500, 600, 800, 950 Гц). Це важливо для оцінки якості електроенергії та роботи перетворювачів.

4. Проведено оцінку адекватності розробленої математичної моделі за критеріями Фішера ( $F = 0,965 < F_{кр} = 1,109$ ), Стюдента ( $|t| = 0,1558 < t_{кр} = 1,9647$ ), коефіцієнтом детермінації  $R^2 = 0,9998$  та середньоквадратичною похибкою  $RMSE = 0,49$  В (відносна похибка не перевищує 2,34 %). Доведено, що модель не має систематичних помилок, є адекватною та придатною для інженерних розрахунків електромагнітної сумісності.

5. Визначено практичне призначення моделі: вона може використовуватися на стадії проектування (оптимальне прокладання кабелів, вибір фільтрів та екранів), під час експлуатації (моніторинг електромагнітної обстановки, прогнозування аварій) та для визначення причин відмов. Розроблена модель є науково-технічним обґрунтуванням для розробки нових методів обслуговування РК і шляхів підвищення завадостійкості.

## РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГАРМОНІЙНОГО СКЛАДУ ТЯГОВОГО СТРУМУ

### 3.1. Методи вимірювання гармонічних завад в рейковому колі

Для вирішення поставлених завдань – підвищення завадостійкості рейкових кіл (РК) та визначення джерел гармонійних завад – розроблено комплексну методику експериментальних досліджень. Методика базується на положеннях [129–136], чинних інструкціях з технічного обслуговування пристроїв СЦБ [11] та враховує як стаціонарні (на постах електричної централізації), так і динамічні (під час руху поїзда) режими роботи. Усі дослідження виконувались з використанням сучасного вимірювального обладнання: цифрових USB-осцилографів Hantek 6254 BC та Frinzi 1014D, а також мультиметрів С-4380 та М-01.

Першочерговим завданням було мінімізувати вплив зовнішніх електромагнітних завад на точність вимірювань. Тому вирішено проводити діагностику безпосередньо на посту електричної централізації (рис. 3.1, 3.2), а не в польових умовах. Такий підхід дозволяє аналізувати спектральний склад як корисних кодових сигналів, так і зворотних тягових струмів у ключових точках РК, де зосереджена основна апаратура (виходи трансформаторів, фільтрів, колійних реле). Вимірювання виконуються в тих же контрольних точках, що й при звичайному технічному обслуговуванні (1–2, 3–4, 5–6, 7–8 згідно з рис. 3.1–3.2), що забезпечує сумісність з існуючими регламентами [11].

Рівняння передачі такого чотириполосника в системі А, В, С, D – параметрів має наступний вигляд [129]:

$$\begin{cases} U_1 = U_2A + I_2B, \\ I_1 = U_2C + I_2D. \end{cases} \quad (3.1)$$

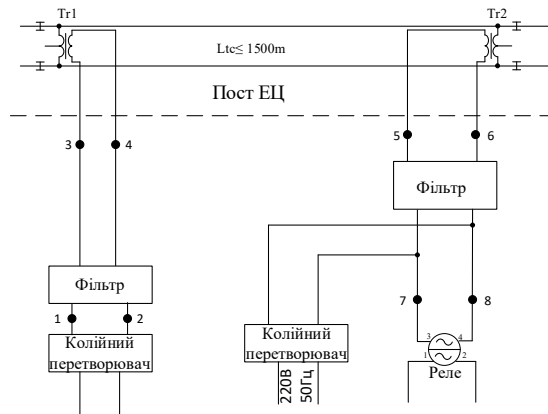


Рисунок 3.1 – Схема станційного рейкового кола частотою 50 Гц

Напруги та струми на початку  $U_1, I_1$  та в кінці  $U_2, I_2$  рейкового кола визначаються під час вимірювань у точках 3-4 та 5-6 (див. рис. 3.1) в нормальному режимі роботи. Чотирьополісник рейкової лінії вважається симетричним і виражається через вторинні параметри: хвильовий опір  $Z_w$  та коефіцієнт поширення хвилі  $\gamma$ . Розрахунок цих параметрів є необхідним для подальшого моделювання шунтового, контрольного режимів, режимів АЛС та короткого замикання, а також для визначення критичних коефіцієнтів, що характеризують надійність роботи РК. [130]

$$A=D=\cosh(\gamma l), B=Z_w \sinh(\gamma l), C=\frac{1}{Z_w} \sinh(\gamma l). \quad (3.2)$$

Параметри чотирьополісника рейкової лінії визначаються за наступними формулами та за результатами вимірювань напруг і струмів на початку  $U_1, I_1$  та в кінці  $U_2, I_2$  РК:

$$A = \frac{U_1 I_1 + U_2 I_2}{U_2 I_1 + U_1 I_2}, B = \frac{U_1 - A U_2}{I_2}, C = \frac{I_1 - A I_2}{U_2}. \quad (3.3)$$

Експеримент на посту ЕЦ виконувався згідно з алгоритмом, наведеним на рис. 3.3. На першому етапі проводилась перевірка працездатності РК в нормальному режимі (відсутність рухомого складу) та підключення

вимірювальних приладів до контрольних точок. Другим етапом здійснювалась реєстрація осцилограм напруг і струмів на живильному та релейному кінцях РК. Для кожної точки записувалась часова реалізація сигналу тривалістю не менше 20 періодів несучої частоти, що забезпечувало необхідну роздільну здатність при подальшому швидкому перетворенні Фур'є (FFT). Третій етап передбачав обчислення коефіцієнтів A,B,C,D та вторинних параметрів РК за формулами (3.2)–(3.3). На четвертому етапі, використовуючи отримані параметри, розраховувались характеристики РК у різних режимах (шунтовому, АЛС, короткого замикання) та визначались критичні коефіцієнти. Завершальним етапом був спектральний аналіз зареєстрованих сигналів: для кожної контрольної точки будувался амплітудний спектр (приклад – рис. 3.5–3.11), виділялись канонічні гармоніки (кратні 50 Гц) та неканонічні складові, їх амплітуди порівнювались із допустимими рівнями (наприклад, для гармоніки 50 Гц – не більше 50 % від мінімального кодового струму). Отримані результати дозволили зробити висновки про якість роботи як релейних, так і мікропроцесорних систем централізації.

Схему РК тональної частоти 480 Гц з частотою модуляції  $\pm 12$  Гц дано на рис.3.2.

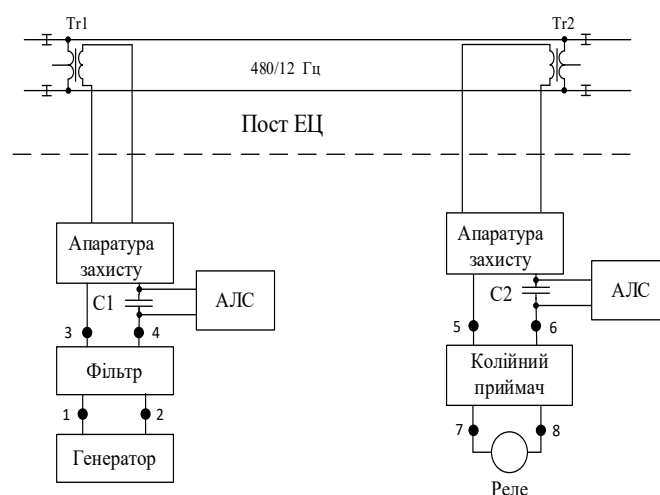


Рисунок 3.2 – Схема РК тональної частоти 480 Гц з частотою модуляції  $\pm 12$  Гц

Алгоритми виконання вимірів параметрів РК і ЕМЗ на посту ЕЦ і на полі наведено на рис.3.3, 3.4 відповідно.

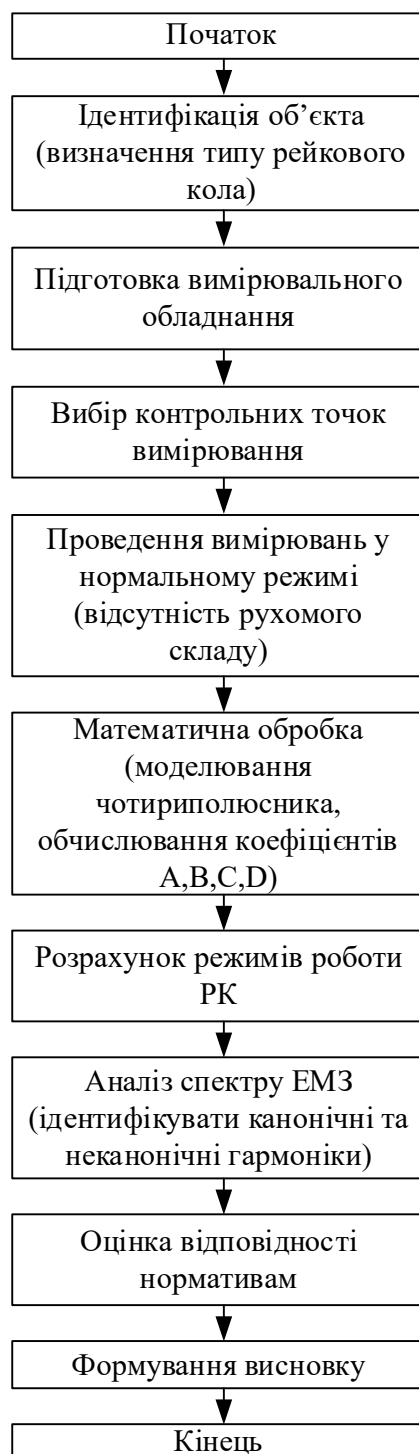


Рисунок 3.3 –Алгоритм вимірювання електромагнітних завад на посту ЕЦ

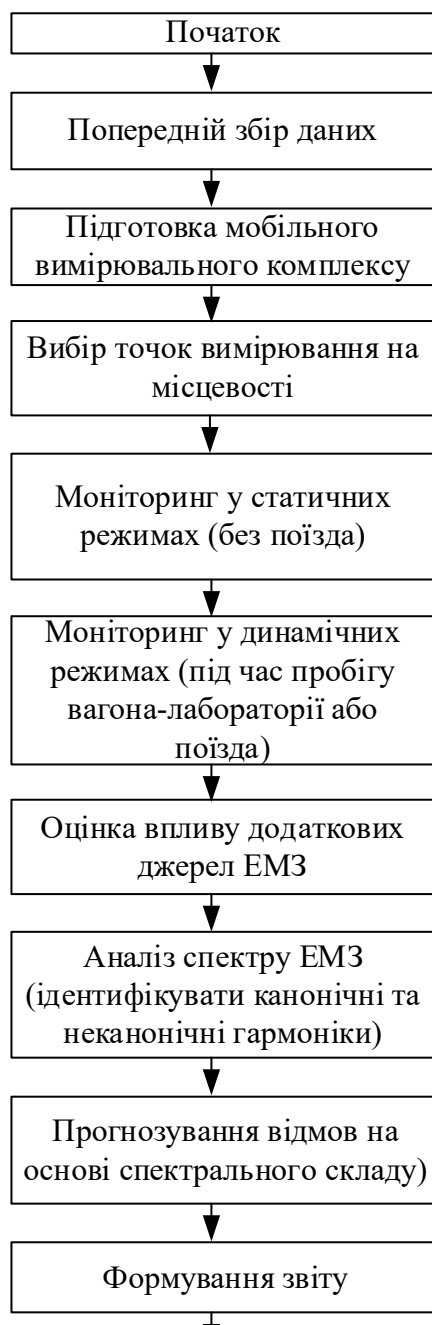


Рисунок 3.4 – Алгоритм моніторингу електромагнітних завад на полі

### **3.2. Моніторинг електромагнітних перешкод та кодового струму в системі централізації станції при електричній тязі постійного струму**

Електромагнітне середовище на залізниці є надзвичайно складним через вплив тягового струму, роботу реле, комутаційних апаратів, світлодіодного освітлення, радіостанцій тощо [132, 134]. Існує кілька зауважень щодо потенційних джерел ЕМЗ у рейкових колах, заснованих на

реальних випадках, про які повідомив експлуатаційний персонал (електромеханіки СЦБ) регіональної філії «Придніпровська залізниця» АТ «Укрзалізниця». Фазочутливі кодові рейкові кола, що працюють на частоті 50 Гц із секторним дворожковим реле ДСШ-12, а також тональні рейкові кола, що працюють на частотах 420, 580 та 720 Гц із частотою модуляції  $\pm 12$  Гц, та на частотах 480, 580 та 780 Гц із частотою модуляції  $\pm 8$  Гц, зазвичай використовуються на станційних коліях залізниць із системою постійного тягового струму. Ці системи піддаються впливу різних джерел ЕМЗ, які можуть впливати на їхню роботу, призводячи до проблем із чіткістю сигналів та загальною надійністю регулювання руху поїздів. Повідомлені випадки підкреслюють вплив таких завад на стабільність роботи рейкових кіл.

Кілька практичних випадків з експлуатації станційних рейкових кіл виявляють наступні проблеми.

Сильні ЕМЗ та шуми спостерігаються в релейній кімнаті поста електричної централізації (поста ЕЦ). Вони спричинені не лише впливом тягового струму постійного струму, але й роботою реле та інших електромагнітних апаратів. Це частіше трапляється в ситуаціях, коли опір баласту (ізоляції) є низьким; є несправності (такі як обриви) в тягових з'єднувачах, або коли тягова підстанція працює в аварійних чи форсованих режимах[132].

Вплив світлодіодного освітлення полягає в наступному. Заміна традиційних ламп розжарювання на світлодіодні лампи призводить до генерації низькочастотних електромагнітних завад на шинах живлення поста ЕЦ. Ці ЕМЗ можуть спричиняти перебої в кодуванні або створювати прогалини в передачі коду, особливо під час нічної роботи. ЕМЗ, генеровані освітленням, можуть заважати радіомовленню, а також поїзному та станційному телефонному зв'язку. Ці завади проявляються як шум, шипіння або переривання сигналу мовлення [134].

Робота радіостанцій та провідних систем гучномовного зв'язку додає додаткові електромагнітні завади, які не тільки впливають на пристрої, але й

створюють додаткові електромагнітні поля (ЕМП) для обслуговуючого персоналу.

Низькочастотні гармоніки на частотах 50, 75, 100, 150, 250 і до 3000 Гц спостерігалися на ділянках залізниць із системою електротяги постійного струму. Найнебезпечнішими є ті гармоніки, частоти яких збігаються з несучою частотою сигнального струму. Наприклад, якщо амплітуда гармоніки 50 Гц досягає 50 % мінімального рівня кодового струму, це може призвести до заповнення кодових пауз.

Спектр кодових сигналів та зворотних тягових струмів у станційних фазочутливих кодових РК на частоті 50 Гц показано на рис. 3.5 для живильного кінця (вимірювальні входи 3-4, рис. 3.2). Канонічні гармоніки спостерігаються на низьких частотах 100, 150, 200, 250 та 300 Гц. Ці гармоніки спричинені однофазним випрямлячем обладнання на посту ЕЦ. Дані ЕМЗ сприяють виникненню збурень. Вимірювання, проведені в інших контрольних точках для даного рейкового кола та додаткових рейкових кіл, не виявили відхилень. Таким чином, станційна система блочної маршрутно-релейної централізації функціонує правильно та безпечно. Параметри кодового струму відповідають нормам.

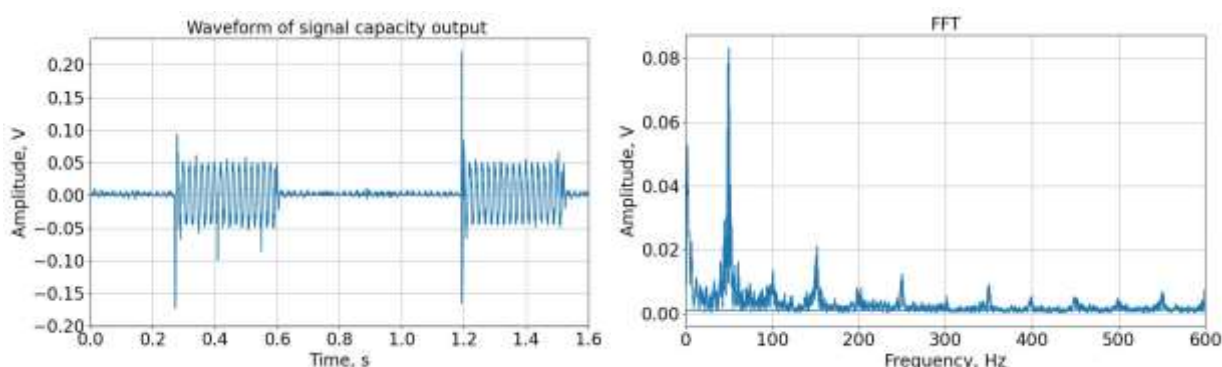


Рисунок 3.5 – Форми сигналу та спектр кодових та зворотних струмів у схемах кодової рейки на кінці живлення термопар

Дослідження тональних РК мікропроцесорної системи централізації (МПЦ-1). На виходах генератора (точки 1–2, рис. 3.6) виявлено сигнал

480±12 Гц та гармоніки: 1440±12 Гц (0,47 В), 2410±12 Гц (0,15 В), 3372±12 Гц (0,17 В), 4333±12 Гц (0,07 В). Після фільтрації (точки 3–4, рис. 3.7) та на виходах фільтрів релейного кінця (точки 5–6, рис. 3.8) завади практично відсутні.

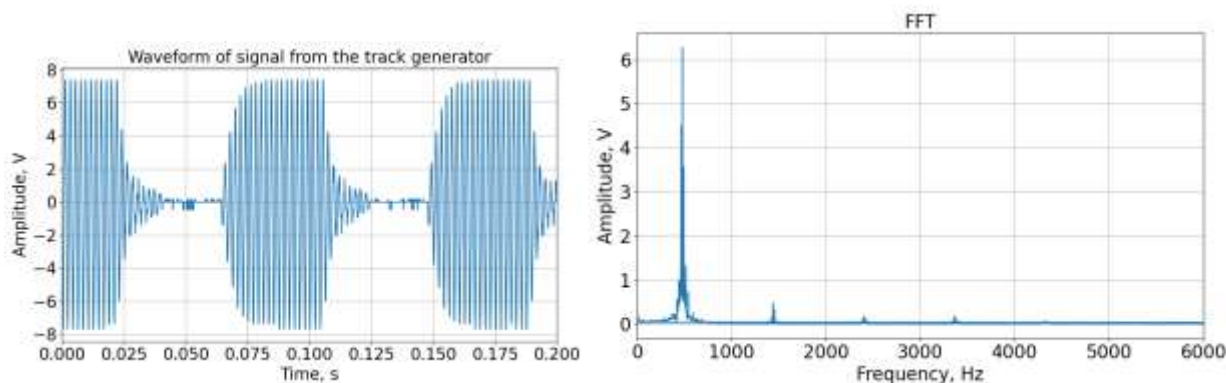


Рисунок 3.6 – Форма та спектр кодових сигналів і зворотних струмів у рейковому колі зі сторони живильного кінця (1-2 точки)

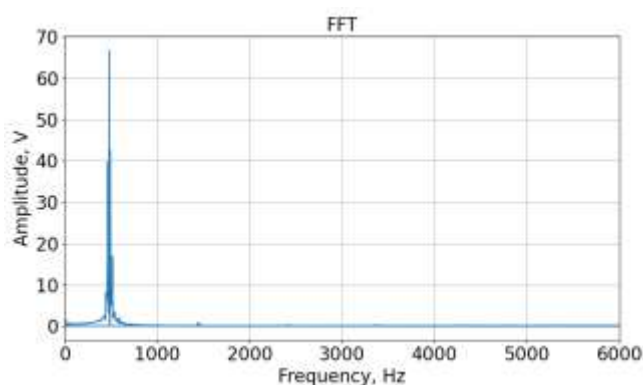


Рисунок 3.7 – Спектр сигналу після фільтрації на живильному кінці ТРК (3-4 точки)

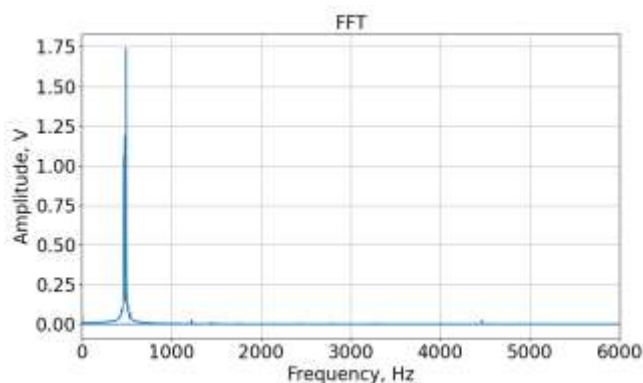


Рисунок 3.8 – Спектр сигналу у точках виміру 5-6 колійного приймача ТРК

Однак на входах колійного реле (точки 7–8, рис. 3.9) присутні як канонічні гармоніки (50, 100, 150...2000 Гц), так і неканонічні (25, 75, 125...2025 Гц). Осциллограми сигналу та спектр електромагнітних завад у приміщеннях поста ЕЦ та МПЦ показано на рис. 3.10 та 3.11.

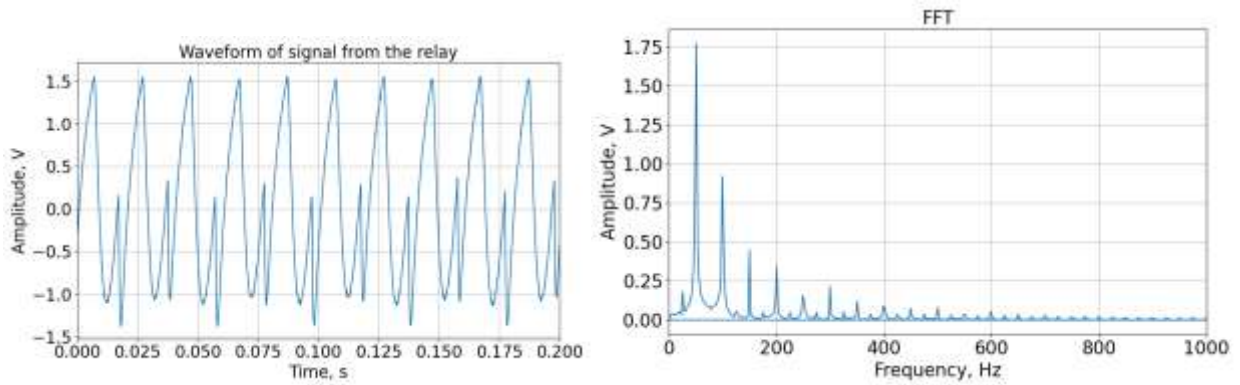


Рисунок 3.9 – Осциллограма та спектр сигналу на 7-8 входах колійного реле  
ТРК

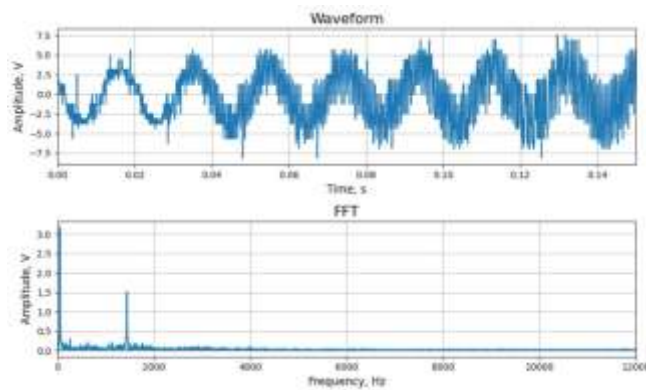


Рисунок 3.10 – Результати дослідження форм сигналу та спектрального  
складу електромагнітних завад у релейному приміщенні ЕЦ

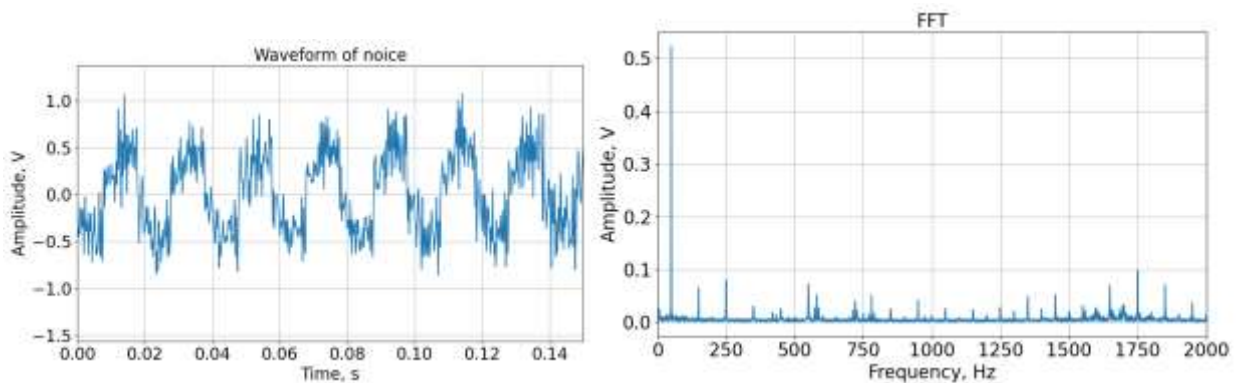


Рисунок 3.11 – Результати дослідження спектрального складу  
електромагнітних завад у релейній кімнаті мікропроцесорної  
централізаційної станції

Спектр завад у приміщенні МПЦ (рис. 3.11) значно ширший, ніж у релейній системі (рис. 3.10), при нижчих рівнях корисного сигналу. Зазначені завади впливають також на радіо- та телекомунікаційне обладнання [133, 136]. Порівняльний аналіз показав, що релейні системи добре працюють в умовах звичних завад, а мікропроцесорні – перспективніші (енергозбереження, компактність, нижча вартість), але чутливі до ширшого спектру ЕМЗ. Обидві системи надійно виконують свої функції навіть за наявності гармонік зворотного тягового струму.

### **3.3. Методи контролю параметрів кодового струму та електромагнітних завад у метрополітені**

#### **3.3.1. Контроль параметрів рейкового кола і електромагнітних завад на посту ЕЦ**

У метрополітені РК разом із системою АЛС-АРС контролюють вільність колії, цілісність рейок, передають сигнали на локомотив та автоматично регулюють швидкість [131]. Схема дослідження параметрів кодового струму тонального РК та пов'язаних гармонік наведена на рис. 3.12. Кожне РК складається з боку живлення та боку реле. До боку живлення входять генератор, підсилювач, фільтр, захисні пристрої (запобіжник FU, розрядник FV), регулювальні елементи (R2, C1), контакти реле та силовий трансформатор. До боку реле входять 16П та 14П колійні реле, спеціальний блок ПРЦМ; захисні пристрої (запобіжник FU, розрядник FV); регулювальний елемент R2; контакти реле та силовий трансформатор. Схема рейкового кола також включає фільтри АЛС та схеми роботи.

Результати випробувань напруги на вхідному та вихідному генераторі, підсилювачі, колійному фільтрі та його елементах (індуктивність та конденсатор), блоці ПРЦМ та колійному реле наведено в табл. 3.1. Ці випробування проводяться кожні п'ять років або під час заміни блоків.

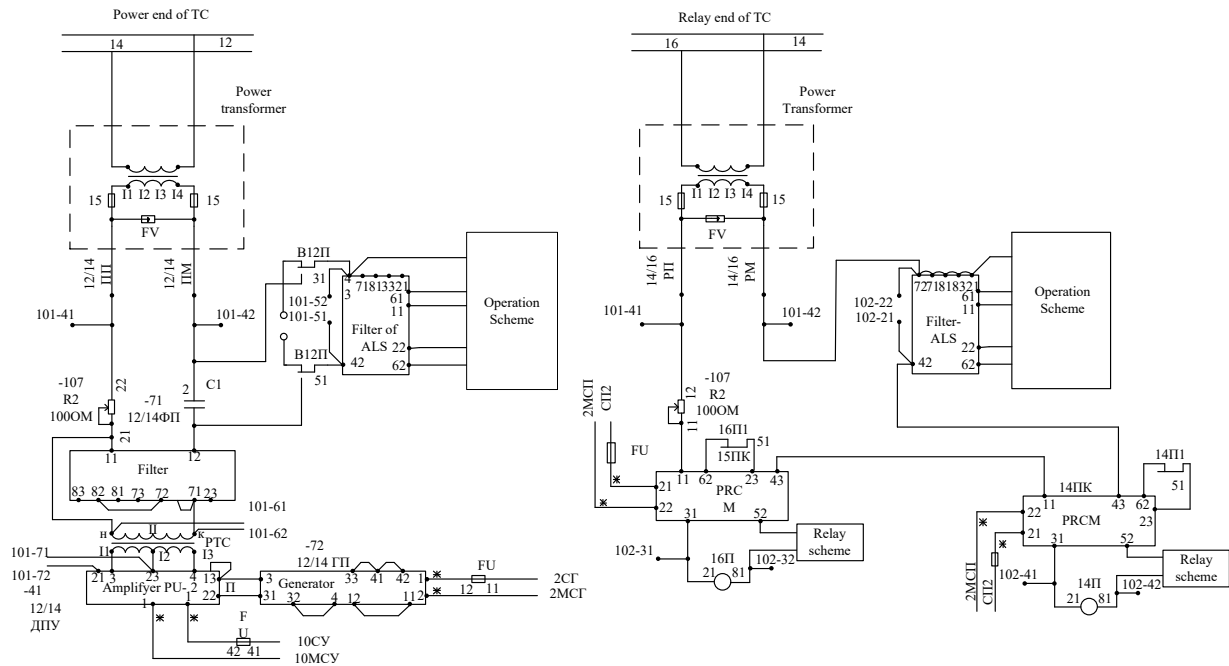


Рисунок 3.12 – Схема дослідження параметрів кодового струму тонального рейкового кола та відповідних гармонік метрополітену

Таблиця 3.1 – Результати вимірювання напруги ТРК

Рік	Вхід генератора, В	Вихідна потужність генератора, В	Вхід підсилювача, В	Вихідна потужність підсилювача, В	Вхідний сигнал трекових фільтрів, В	Індуктивність трекових фільтрів, В	Ємність фільтра доріжки, В	Вихідний сигнал трекових фільтрів, В	Вхід до ПРЦМ, V	Вихід ПРЦМ, В	Вихід реле сигналізації, В
2019	18.0	4.5	18	24	2.3	18	17	8.4	17,5	1.3	6.5
2020	17,5	4.15	17.8	25.6	2.8	18.8	19.2	9.3	17.4	1.1	6.6
2023	16.7	4.77	18.15	24,5	2.45	18,5	18	9	18	1.35	7.0

Система АЛС-АРС використовує кодові сигнали 75, 125, 175, 225, 275 Гц (відповідають швидкостям 80, 70, 60, 40, 0 км/год), які передаються паралельно рейковому колу. ТРК працюють на частотах 725 і 775 Гц з модуляцією 8 та 12 Гц.

Вимірювання проводили для тонального контуру  $725 \pm 12$  Гц. У табл. 3.1 наведено дані вольтметра. Одночасно за допомогою осцилографів реєстрували сигнали на входах/виходах генератора, підсилювача, фільтра (на індуктивності L, ємності C), блока ПРЦМ та реле.

Живлення генератора – змінний струм 50 Гц, номінальна напруга 17,5 В (допустиме відхилення 15,7...18,4 В). Збурень на вході не виявлено. Генератор є потужним джерелом завад. Його вихідний сигнал та спектр (рис. 3.13) містять лише низькочастотні завади, кратні 50 Гц. Оскільки кодові частоти АЛС-АРС (75, 125, 175, 225, 275 Гц) не збігаються з цими гармоніками, амплітуди останніх не перевищують допустимих значень.

Колійний фільтр використовується для адаптації силових клем централізованих пристроїв живлення до рейкового кола, обмеження спектру амплітудно-модульованого сигналу, що надходить від колійного підсилювача, та захисту колійного підсилювача від можливих перевантажень, які можуть виникнути всередині колій.

У системі АЛС-АРС Метрополітену використовуються фільтри з частотами 575, 725 та 775 Гц. Процес вимірювання відбувається на каскаді фільтра: на виходах індуктивності L, конденсатора C та всього фільтра для забезпечення належного функціонування його компонентів. Форми сигналів та спектр напруги на виходах фільтра 11-71 та 13-71 показано на рис. 3.14 та 3.15 відповідно[131].

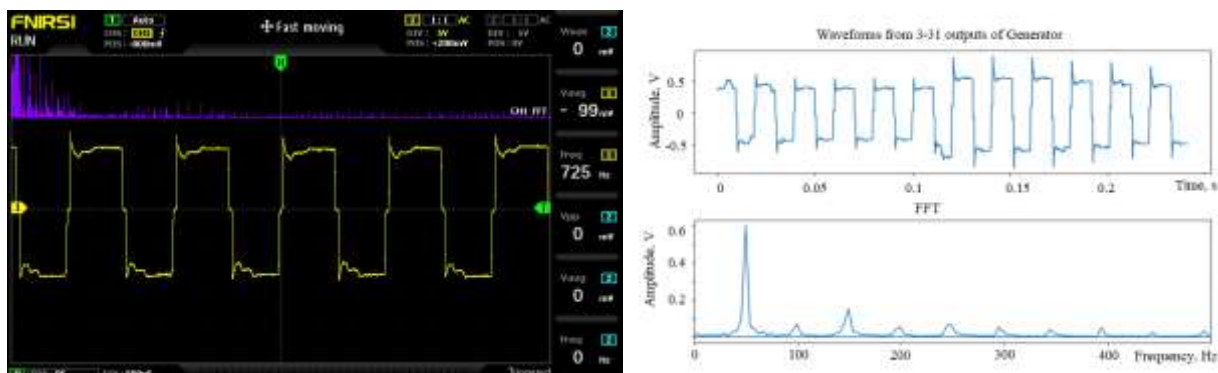


Рисунок 3.13 – Форми сигналу та спектр напруги на виході генератора були записані за допомогою осцилографів Frinssi та Hantek

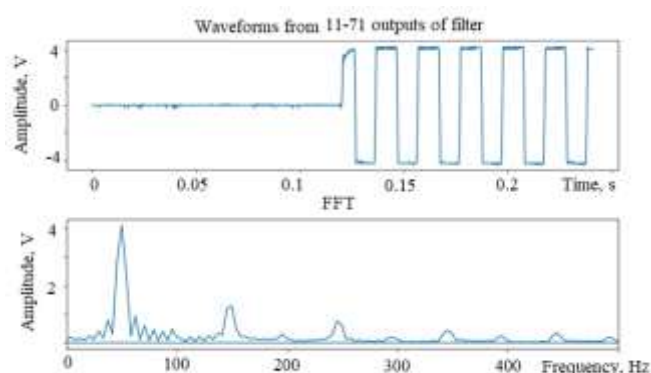


Рисунок 3.14 – Форма хвилі та спектр напруги на виходах 11-71 фільтрів 725 Гц

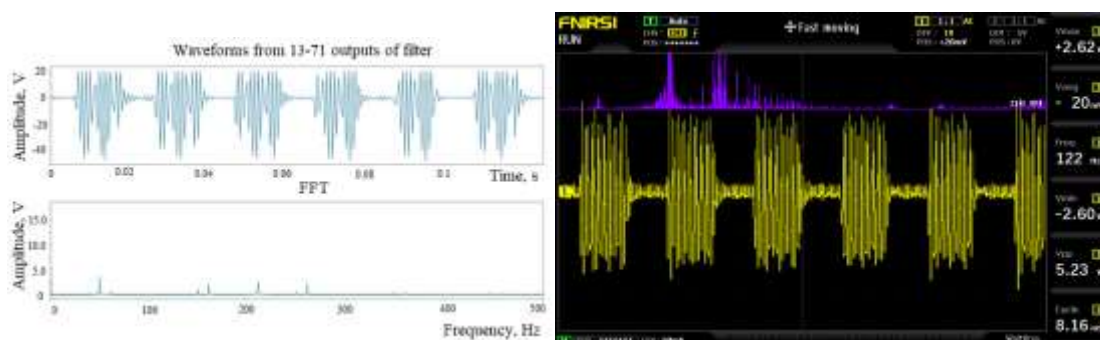


Рисунок 3.15 – Форма хвилі та спектр напруги на виходах 13-71 фільтрів 725 Гц

Пристрій приймального кінця ПРЦМ приймає та декодує АМ-сигнал з колії. Він забезпечує надійну роботу колійного реле на заданій модульованій частоті та ослаблення сигналів з іншими частотами. ПРЦМ живиться змінним струмом 17,5 В (15,7...18,4 В).

На виході колійного реле (рис. 3.16) у спектрі присутня постійна складова та гармоніки, кратні 50 Гц. Це потребує подальших досліджень ЕМС РК із системою тягового електропостачання.

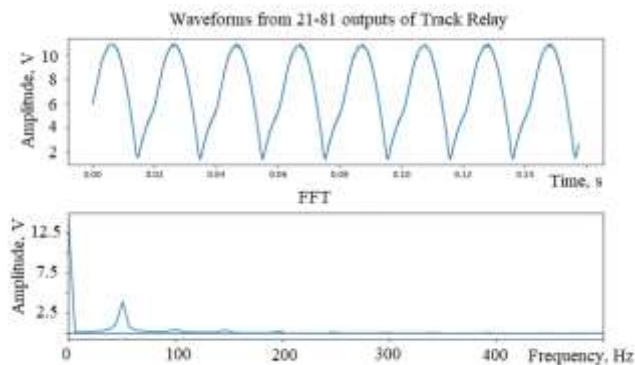


Рисунок 3.16 – Форма сигналу та спектр напруги на виходах 21-81 колійного реле

Запропоновано метод перевірки електромагнітної сумісності (ЕМС) рейкових кіл на станції ЕК. Проведений на місці аналіз роботи рейкових кіл без електропоїздів (нормальний режим роботи рейкового кола) продемонстрував їх стабільну роботу. Якість напруги живлення на входах елементів рейкового кола є задовільною, що свідчить про придатність для тяги постійного струму.

### 3.3.2 Метод дослідження електромагнітних завад у метрополітені одночасно з декількох РК

Особливістю досліджень у метрополітені стало те, що завади від тягових двигунів мають яскраво виражений динамічний характер і змінюються при русі поїзда. Для їх виявлення та ідентифікації розроблено вдосконалений метод, який відрізняється від описаного вище тим, що вимірювання проводяться одночасно на чотирьох послідовно розташованих тональних РК (52, 54, 56, 58 на підході до станції «Вокзальна» Дніпровського метрополітену). Як контрольні точки обрано спільні виходи кіл – дужки кросового стативу, підключені до силових з'єднань кожного РК. Це

дозволило виключити вплив додаткових проміжних пристроїв та спостерігати зміну спектру сигналів у реальному часі.

Алгоритм динамічного моніторингу наведено на рис. 3.17. Він передбачає такі кроки:

1. Калібрування та синхронізація. Чотириканальний осцилограф Nantek 6254 BC підключається до виходів РК 52, 54, 56, 58. Встановлюється частота дискретизації 1 ГСа/с, режим синхронізації за зовнішньою подією (початок руху поїзда).

2. Запис фонових сигналів. Реєструються осцилограми та спектри в нормальному режимі (за відсутності поїзда) для всіх чотирьох РК (рис. 3.19–3.22). Це необхідно для подальшого порівняння.

3. Запис при наближенні та в'їзді поїзда. Фіксується момент займання спочатку РК52 (рис. 3.23), потім РК54 (рис. 3.24), РК56 (рис. 3.25). Для кожного РК зберігається часова реалізація сигналу на інтервалі від моменту в'їзду до повного займання кола.

4. Запис при розгоні поїзда. Окремо реєструється сигнал на РК58 під час старту поїзда з місця (рис. 3.26). Цей режим є найбільш критичним, оскільки супроводжується максимальним зворотним тяговим струмом.

5 Спектральна обробка. До кожного записаного сигналу застосовується швидке перетворення Фур'є (FFT) з вікном Хеммінга для зменшення спектральних витоків. Отримуються амплітудні спектри в діапазоні до 3 кГц.

6 Ідентифікація джерел завад. Виділені гармоніки порівнюються з розрахунковими частотами, що генеруються тяговими двигунами: частота обертання  $f = pn/60$ , зубцеві гармоніки  $f_z = zn/60$ , колекторні гармоніки  $f_k = kn/60$ , де  $n=1480$ ,  $z=211$ ,  $k=210$ ,  $p=2$ . Поява гармонік 150 Гц та 300 Гц розглядається як ознака завад від системи керування двигуном, а гармоніки, близькі до 49,3 Гц – як потенційна несправність самого двигуна.

У цьому дослідженні представлено вдосконалений метод дослідження електромагнітних завад, що відрізняється від методу представленому у розділі 3.1, [131]. Він вимірює сигнали від кількох рейкових кіл,

розташованих послідовно. Ці вимірювання використовуються для аналізу стану РК під час нормальної експлуатації, рівня, частот сигналів та їх спектрального представлення, впливу на рейкове коло під час проходження поїзда, впливу тягового струму та стану рейкового кола після проходження поїзда. Цей метод дозволяє в режимі реального часу виявляти зміни впливу зворотного струму поїзда на ділянку, що складається з кількох рейкових кіл з різними несучими та модуляційними частотами. Особлива увага приділяється оцінці гармонійних спотворень під час спектрального аналізу за різних умов експлуатації.

Розроблений алгоритм методу контролю завад у метрополітені дано на рис.3.17. Схема блокової секції тональних рейкових кіл, розташованих на підході до станції «Вокзальна» Дніпровського метрополітену, яка складається з чотирьох ТРК дано на рис.3.18. В якості точки вимірювання були обрані спільні виходи кіл у рейкових колах, а саме дужки кросового стативу, які підключені до силових з'єднань окремих рейкових кіл, [136].

Вимірювання сигналів у рейковому колі надає інформацію про параметри сигналу, зокрема про рівні напруги, частотний спектр та гармонічні складові. Вимірювання сигналу під час руху поїзда дозволяє аналізувати зміни сигналу, амплітудний спектр та виникнення гармонік, пов'язаних з роботою тягового двигуна, і, що найважливіше, вплив електромагнітних завад на систему. Дослідження в динамічних умовах, зокрема під час гальмування та розгону поїзда, дозволяють виявляти імпульсні збурення та їх вплив на систему автоматизації. Найбільший зворотний струм, який може впливати на систему автоматизації, протікає під час розгону поїзда.

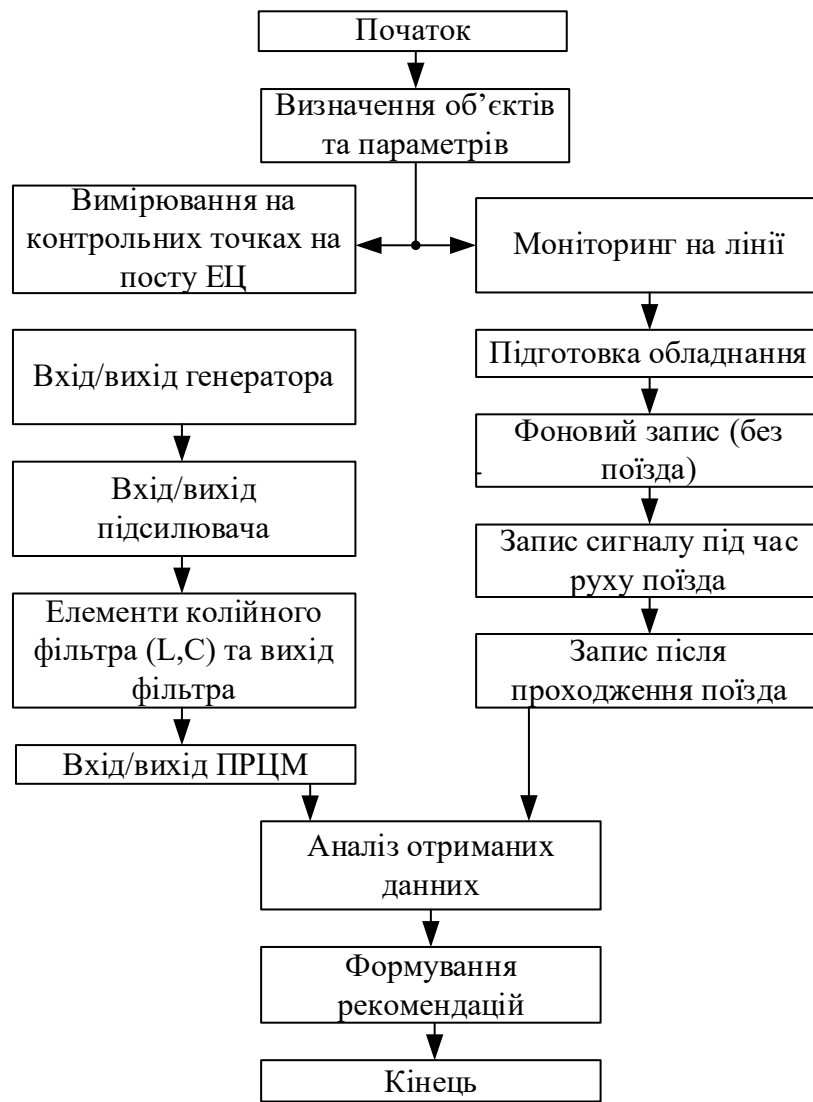


Рисунок 3.17 – Алгоритм методу контролю завад у метрополітені

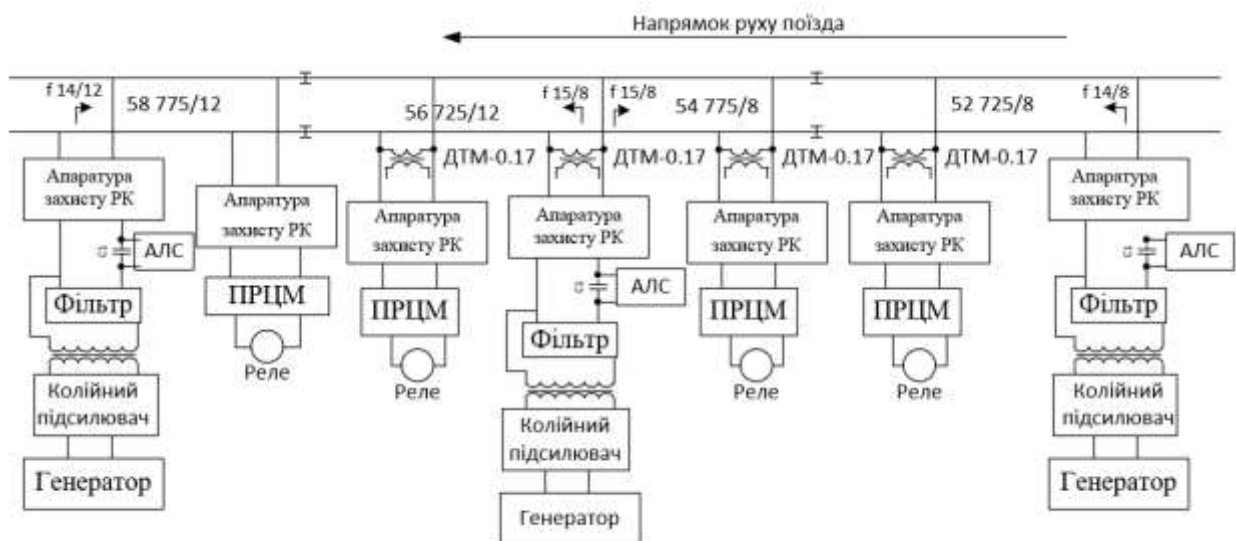


Рисунок 3.18 – Схема блокової секції тональних рейкових кіл

Особливістю експерименту є використання сучасного дослідницького обладнання, яке дозволяє одночасно реєструвати кілька сигналів, аналізувати їх у режимі реального часу, оцінювати залізничні кола з різними частотними параметрами та виявляти вплив електромагнітних завад у різних режимах роботи.

Обґрунтування вибору цього методу полягає у використанні комплексного підходу, який досліджує статичні та динамічні характеристики рейкового кола, їх зміни та роботу рейкового кола в умовах значних електромагнітних завад. Використання цих точок вимірювання дозволило виключити вплив зовнішніх пристроїв. Використання швидкого перетворення Фур'є дозволило оцінити спектр сигналу, забезпечити високу точність спектрального аналізу, а також виявити сторонні гармоніки, їх рівні та їх вплив на корисний сигнал рейкового кола.

Сигнал було записано за певних умов: під час нормальної роботи, під час проходження поїзда через РК, під час розгону поїзда та після повного проходження поїздом цієї ділянки. Потім до отриманого сигналу було застосовано швидке перетворення Фур'є. Результати, отримані під час обробки сигналу, представлені графічно.

Діаграми нормального режиму роботи без потяга показані на рис. 3.19 – 3.22.

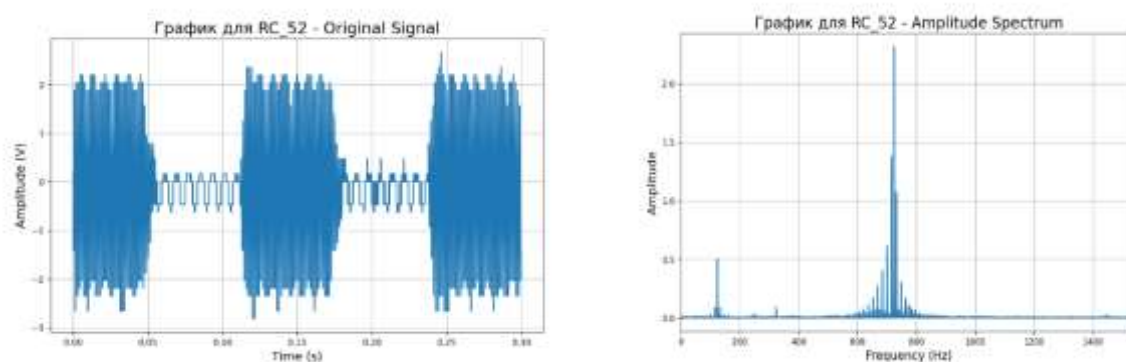


Рисунок 3.19 – Часові діаграми та спектр РК 52

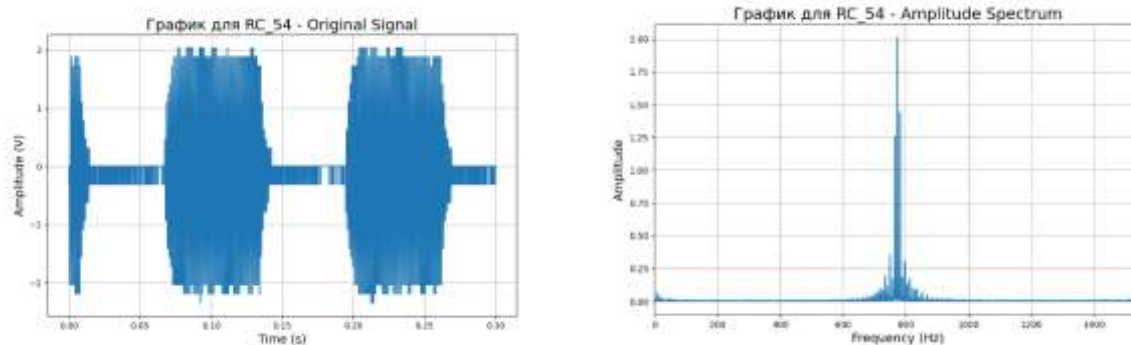


Рисунок 3.20 – Часова діаграма та спектр РК 54

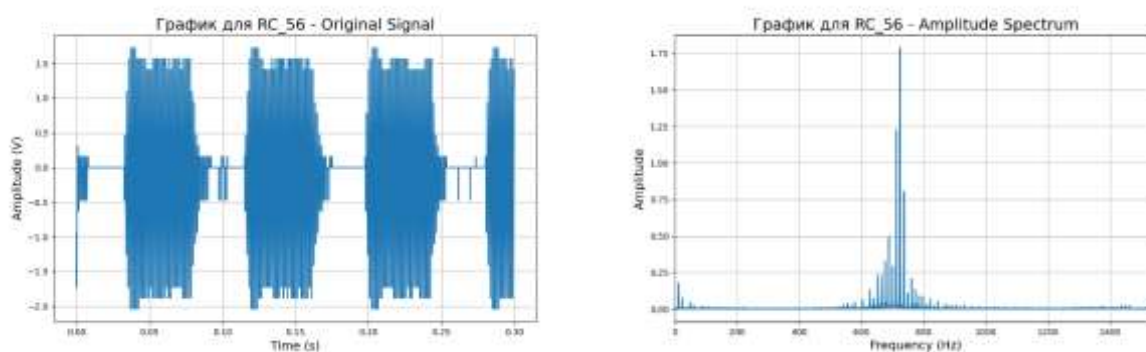


Рисунок 3.21 – Часова діаграма та спектр РК 56

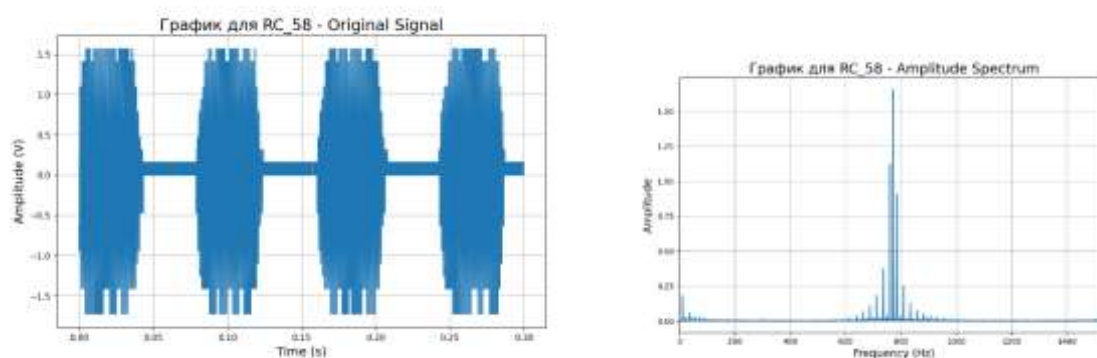


Рисунок 3.22 – Часова діаграма та спектр РК 58

Як показують збережені зображення – осцилограми і їх спектральний аналіз, навіть під час нормальної роботи виникають перебої в інтервалі між корисними сигналами, що свідчить про застарілість системи та необхідність модернізації. Нижче наведено лише схеми зі змінами сигналів. Поїзд прямує в напрямку від РК52 до РК58. У разі займання потягом РК52, сигнал змінюється, як показано на рис.3.19.

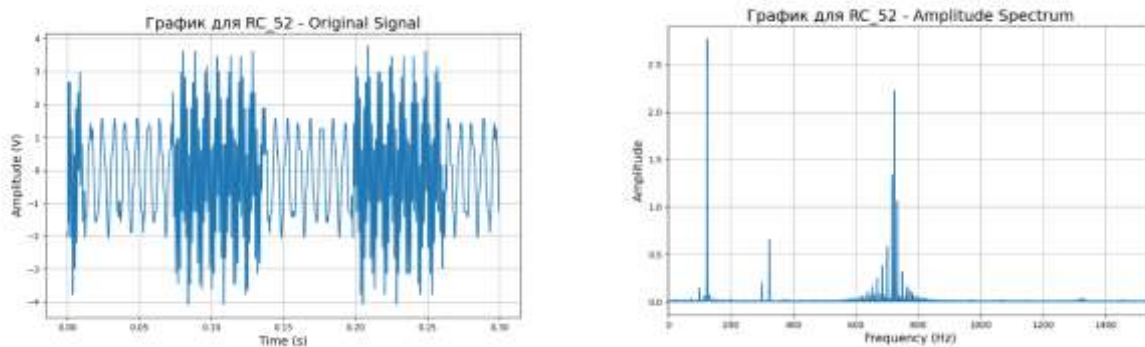


Рисунок 3.23 – Часова діаграма та спектр РК52 при займанні поїздом

Згідно з рис.3.19, в амплітудному спектрі з'являються гармоніки 150 та 300 Гц, що, можливо, відображає збурення, спричинені тяговим двигуном поїзда. Цей ефект також можна спостерігати, коли поїзд спрацьовує наступні RC-імпульси, як показано на рис. 3.24 – 3.25.

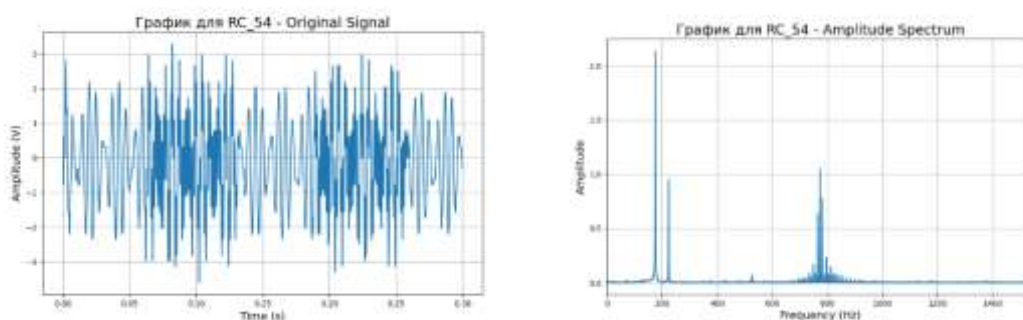


Рисунок 3.24 – Часова діаграма та спектр сигналу РК54 при займанні поїздом

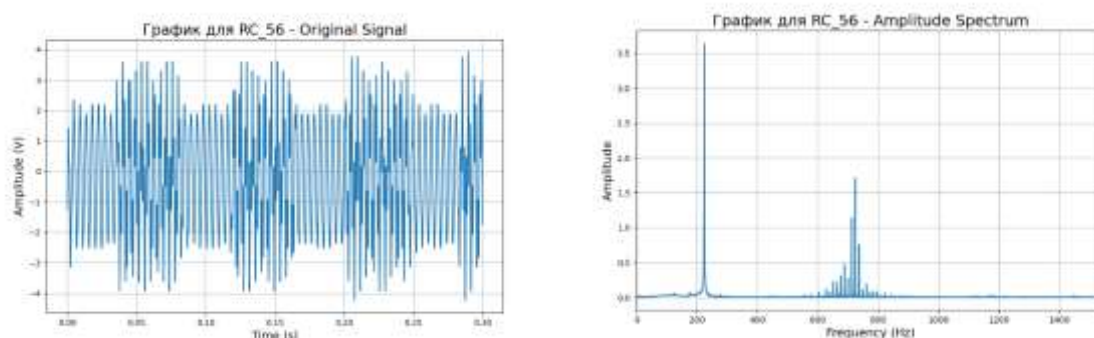


Рисунок 3.25 – Часова діаграма та спектр сигналу РК56 при займанні поїзда

Крім того, коли поїзд рухається зі свого місця, вплив завад на обладнання посилюється, що призводить до ще більшого спотворення сигналу, як показано на рис. 3.26.

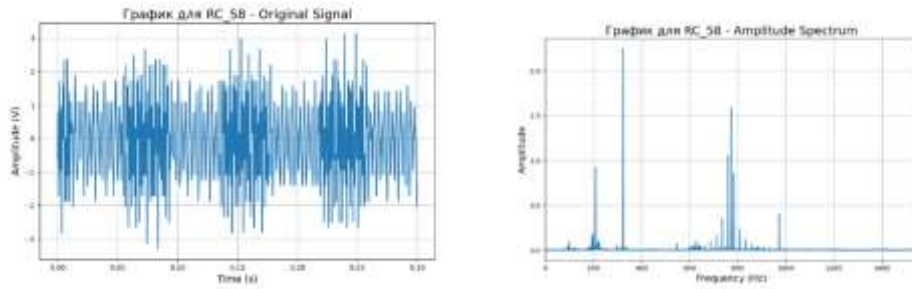


Рисунок 3.26 – Часові діаграми та спектр РК58 під час старту поїзда з місця

Застосування стаціонарної методики на посту ЕЦ показало, що для фазочутливих кодових РК частотою 50 Гц характерні канонічні гармоніки 100, 150, 200, 250, 300 Гц, зумовлені роботою однофазного випрямляча обладнання. Рівні цих гармонік не перевищують допустимих значень, тому релейна система працює безпечно. Для тональних РК у складі мікропроцесорної централізації (МПЦ) виявлено, що хоча фільтри ефективно пригнічують завади на виходах генератора (т. 1–2) та на виходах фільтрів (т. 3–4, 5–6), на входах колійного реле (т. 7–8) присутній широкий спектр як канонічних (50–2000 Гц), так і неканонічних (25, 75, 125...2025 Гц) гармонік. Це свідчить про те, що МПЦ має значно ширшу смугу чутливості до завад при нижчих рівнях корисного сигналу порівняно з релейними системами.

Динамічна методика в метрополітені дозволила встановити, що навіть у нормальному режимі без поїзда існують перебої в паузах між корисними сигналами (рис. 3.19–3.22), що вказує на старіння обладнання. У момент займання РК поїздом в амплітудному спектрі з'являються гармоніки 150 та 300 Гц (рис. 3.23–3.25), які не спостерігаються у вільному стані кола. При розгоні поїзда спотворення сигналу значно посилюються (рис. 3.26), що підтверджує найбільший вплив зворотного тягового струму саме в режимі прискорення. Поява гармонік 150 Гц однозначно вказує на наявність завад від системи керування тяговим двигуном, а за певних умов може свідчити про несправності в колекторно-щітковому вузлі.

Кожен крок розробленої методології має чітке обґрунтування. Вимірювання в нормальному режимі на посту ЕЦ необхідні для отримання

еталонних параметрів чотириполюсника РК, без яких неможливе коректне моделювання аварійних режимів. Спектральний аналіз на виході генератора (т. 1–2) дозволяє виявити власні завади джерел живлення, які можуть накладатися на кодовий сигнал. Аналіз на вході колійного реле (т. 7–8) дає змогу оцінити якість роботи всіх фільтруючих елементів РК і визначити реальний рівень завад, що впливають на приймальну апаратуру. Динамічні дослідження в метрополітені виконуються для виявлення джерел завад, пов'язаних саме з рухом поїзда, які неможливо імітувати в стаціонарних умовах. Одночасна реєстрація чотирьох РК дозволяє прослідкувати поширення завад вздовж блокової секції та оцінити взаємний вплив суміжних кіл. Застосування FFT замість звичайних вольтметрів є критично важливим, оскільки лише спектральний метод дає змогу кількісно визначити амплітуди окремих гармонік та ідентифікувати їх джерело. Отримані результати слугують основою для розробки практичних рекомендацій: заміни застарілих фільтрів, встановлення активних завадогасних пристроїв, екранування кабельних ліній та переходу на сучасну апаратуру з підвищеною завадостійкістю.

Таким чином, запропонована методологія забезпечує комплексний підхід до діагностики електромагнітної сумісності рейкових кіл – від стаціонарних вимірювань на посту ЕЦ до динамічних спостережень на лінії метрополітену, що дозволяє не лише фіксувати наявність завад, але й встановлювати їхні джерела та механізми впливу на безпеку руху поїздів.

### **3.4. Використання алгоритмів машинного навчання для класифікації електромагнітних завад у рейкових колах**

Традиційні методи виявлення та класифікації електромагнітних завад, що ґрунтуються на пороговому аналізі або детермінованій обробці сигналів, часто виявляються недостатньо ефективними, особливо при впливі нестационарних та перехідних завад. У зв'язку з цим у даному дослідженні запропоновано підхід, заснований на паралельному застосуванні двох різних

за архітектурою моделей машинного навчання: алгоритму глибокого навчання – згорткової нейронної мережі (CNN) для аналізу одномірних часових рядів та класифікатора Random Forest (RF), що використовує набір вручну сконструйованих ознак. Метою такого паралельного аналізу є підвищення достовірності діагностики за рахунок порівняння результатів, отриманих різними методами, а також забезпечення стійкості до шумів та викидів, що характерні для реальних сигналів рейкових кіл. Загальна методологія дослідження включає шість послідовних етапів: генерацію синтетичного набору даних, побудову та навчання моделі CNN на сирих часових реалізаціях, побудову моделі RF на основі ознак, калібрування ймовірнісних виходів обох моделей, оцінку якості класифікації за допомогою ROC-кривих та AUC, а також тестування на реальних сигналах, зареєстрованих у Дніпровському метрополітені.

Для навчання моделей було створено синтетичний набір даних, що імітує реальні умови роботи тональних рейкових кіл метрополітену з частотою кодового сигналу  $725 \pm 12$  Гц. Частота дискретизації становила 12,5 кГц, тривалість кожної реалізації – одна секунда (12500 відліків), а амплітуда корисної складової була нормалізована. Моделювалися п'ять типових станів сигналу: чистий сигнал (без завад), гармонічні завади (з частотами 50, 150, 250, 300, 500 Гц), імпульсні завади (з амплітудою, що вдвічі перевищує корисний сигнал, та випадковими моментами появи), вузькосмугові завади поблизу робочої частоти (діапазони 622–702 Гц та 733–797 Гц з кроком 16 Гц) та широкосмуговий шум. Параметри завад – амплітуда, фаза, кількість імпульсів, спектральна ширина – варіювалися випадковим чином у діапазоні відношення сигнал/завада від –5 до 20 дБ для забезпечення статистичної репрезентативності. Загальний обсяг вибірки становив 3000 реалізацій, які після нормалізації до нульового середнього та одиничної дисперсії були розділені на навчальну (70 %), валідаційну (15 %) та тестову (15 %) вибірки.

Для глибокого аналізу часових послідовностей було реалізовано алгоритм глибокого навчання – одновимірну згорткову нейронну мережу (1D

CNN). Архітектура цього алгоритму включає послідовність трьох згорткових блоків з пакетною нормалізацією та операцією субдискретизації (максимального пулінгу). Перший блок містить 32 фільтри з розміром ядра 7, другий – 64 фільтри з ядром 5, третій – 128 фільтрів з ядром 3. Після згорткових блоків застосовується шар глобального усереднюючого пулінгу, який агрегує ознаки, зменшує розмірність та слугує регуляризацією для запобігання перенавчанню. Далі розміщено повнозв'язний шар зі 128 нейронами та активацією ReLU, після якого йде dropout-шар з ймовірністю відключення 0,5. Вихідний шар використовує функцію активації softmax для отримання ймовірностей належності до одного з п'яти класів. Навчання алгоритму проводилося з використанням адаптивної оптимізації Adam та ранньої зупинки за метрикою помилки на валідаційній вибірці, що дозволило уникнути перенавчання. Схема одновимірного згорткового шару для обробки часових рядів, яка пояснює принцип вилучення локальних ознак, представлена на рис. 3.27.

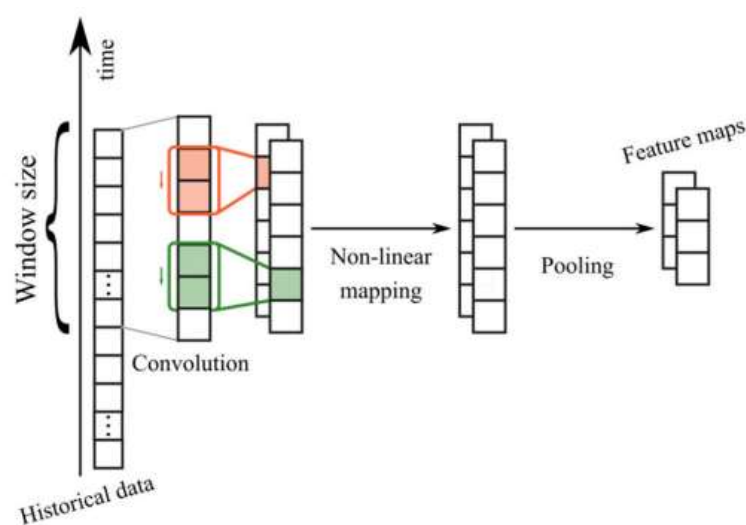


Рисунок 3.27 – Схема одновимірного згорткового шару для обробки часових рядів

На рис. 3.27 схематично зображено принцип роботи одновимірного згорткового шару. Вхідний сигнал (часовий ряд) обробляється набором фільтрів (ядер), які ковзають уздовж часової осі. Кожен фільтр виконує операцію згортки – обчислює суму попарних добутків ваг фільтра та значень

сигналу у поточному вікні. У результаті формується карта ознак, що підкреслює локальні особливості сигналу (наприклад, різкі перепади, характерні форми імпульсів). Це дозволяє мережі автоматично виділяти інформативні патерни, необхідні для класифікації типів завад.

Паралельно з алгоритмом глибокого навчання використовувався ансамблевий метод Random Forest, який працює на основі голосування 200 вирішальних дерев. Для кожної реалізації сигналу формувалася вектор ознак у часовій та частотній областях. До часових ознак увійшли статистичні моменти (середнє значення, дисперсія, середньоквадратичне відхилення, асиметрія, ексцес), пік-фактор та кількість викидів – перевищень заданого порогового рівня. Частотні ознаки отримувалися після швидкого перетворення Фур'є і включали положення та рівень спектральних піків, ширину основної спектральної складової, співвідношення сигнал/шум та енергію в окремих частотних смугах. Вибір Random Forest обумовлений його інтерпретованістю, робастністю до шумів та викидів, а також здатністю ефективно працювати з обмеженим обсягом даних – що особливо важливо при аналізі сигналів з реальних об'єктів, де обсяг розміченої вибірки часто є недостатнім для глибоких алгоритмів. Ілюстрація принципу роботи ансамблевого класифікатора Random Forest на рис.3.28.

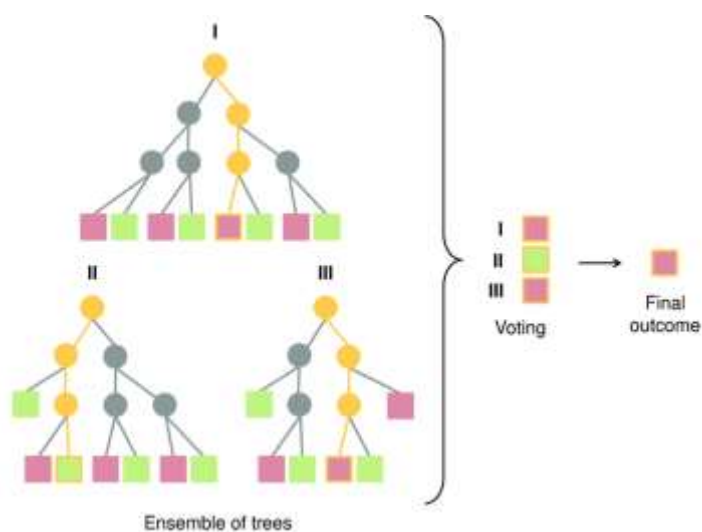


Рисунок 3.28 – Механізм класифікації Random Forest на основі ансамблевого голосування вирішальних дерев

Кожне окреме дерево приймає рішення на основі власного набору ознак та випадкової підвибірки даних. Під час класифікації новий об'єкт (вектор ознак сигналу) подається на всі дерева ансамблю, і вони «голосують» за належність до певного класу. Підсумкове рішення визначається більшістю голосів. Такий підхід знижує ризик перенавчання та підвищує стійкість до шумів, що є критичним для аналізу реальних сигналів рейкових кіл.

Оскільки ймовірнісні оцінки, отримані від алгоритмів машинного навчання, особливо від згорткових нейронних мереж, можуть бути зміщеними (як правило, надмірно впевненими), для отримання реалістичних оцінок достовірності класифікації було застосовано калібрування. Для CNN використовувався метод масштабування температури (temperature scaling), при якому логіти – виходи останнього шару перед softmax – діляться на оптимальний параметр температури  $T$ , що мінімізує від'ємне логарифмічне правдоподібність на валідаційній вибірці. Оптимізація  $T$  проводилася методом L-BFGS-B у діапазоні від 0,1 до 10,0. Для Random Forest калібрування виконувалося з використанням Platt-масштабування (сигмоїдальне калібрування) на основі трикратної крос-валідації за допомогою класу CalibratedClassifierCV бібліотеки scikit-learn. Калібрування забезпечило отримання ймовірностей, які більш точно відображають справжню впевненість моделі, що є критичним для інтеграції в діагностичні системи, де необхідно приймати рішення на основі порогів довіри.

Розроблені моделі були застосовані для аналізу як синтетичних, так і реальних сигналів. На рис. 3.29 представлена осцилограма кодового сигналу в тональному рейковому колі, зареєстрована в Дніпровському метрополітені. Візуальний аналіз часової реалізації дозволяє виявити наявність викидів напруги та спотворень синусоїдної форми, що вимагає подальшого кількісного аналізу. Видно, що форма сигналу відрізняється від ідеальної синусоїди: присутні різкі викиди напруги (імовірно, імпульсні завади) та спотворення амплітуди. Така візуалізація дозволяє попередньо оцінити

рівень завад, проте для точної класифікації необхідний подальший спектральний та ймовірнісний аналіз за допомогою моделей МН.

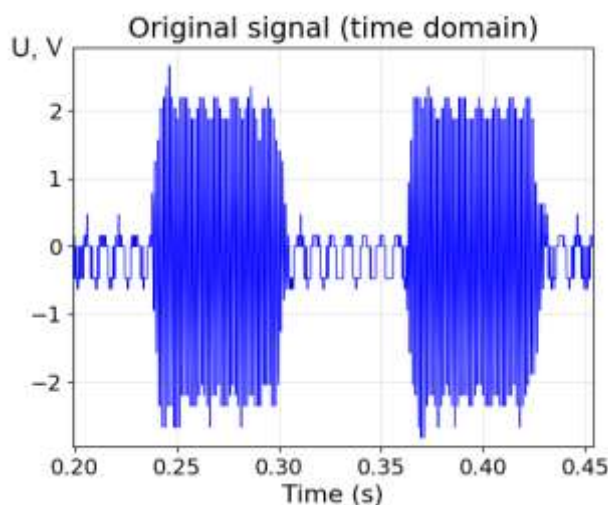


Рисунок 3.29 – Часова реалізація кодового сигналу в тональному рейковому колі  $725 \pm 12$  Гц

Спектральний аналіз, виконаний за допомогою швидкого перетворення Фур'є (FFT) та подальшого калібрування з використанням CNN і RF (рис. 3.30), дозволив ідентифікувати локальні піки, не пов'язані з кодовою частотою. Складові з частотами 125 Гц та 325 Гц, що відповідають сигналам АЛС-АРС, а також додаткові гармоніки, викликані впливом тягової мережі. Кількісна оцінка потужності завад у різних частотних діапазонах дозволяє пов'язати виявлені частоти з типовими джерелами ЕМЗ.

Рис.3.30 демонструє амплітудні спектри досліджуваних сигналів, отримані за допомогою швидкого перетворення Фур'є, а також результати калібрування з використанням моделей CNN та RF. Окрім основної частоти 725 Гц, чітко ідентифікуються гармоніки 125 Гц та 325 Гц, що належать до сигналів АЛС-АРС, а також додаткові піки в діапазонах 150...300 Гц та 400...600 Гц, які відповідають типовим джерелам завад (тягові двигуни, перетворювачі). Калібровані моделі дозволяють кількісно оцінити внесок кожної складової, що полегшує локалізацію джерел ЕМЗ.

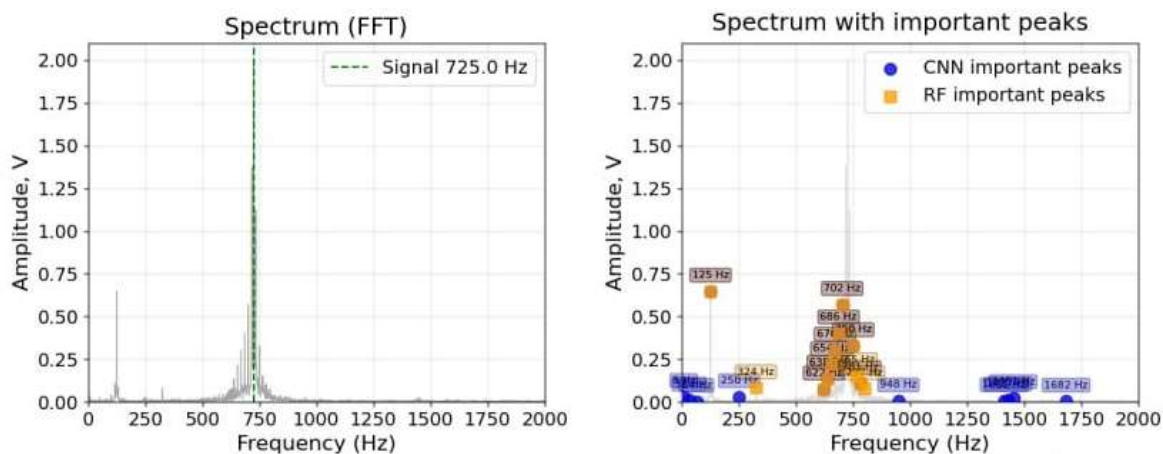


Рисунок 3.30 – Спектри досліджуваних кодових сигналів з ЕМЗ після FFT та калібрування з використанням моделей CNN та RF

Імовірнісна оцінка стану сигналу, отримана обома моделями після калібрування, представлена на рис. 3.31. Висока впевненість (ймовірність, близька до 1) в одному й тому самому класі для обох моделей свідчить про надійність класифікації. Дифузний розподіл ймовірностей вказує на наявність атипових спотворень або сигналів, що виходять за межі навчальної вибірки. У даному прикладі обидві моделі з високою достовірністю ідентифікують наявність гармонічних завад, що узгоджується зі спектральним аналізом на рис. 3.30.

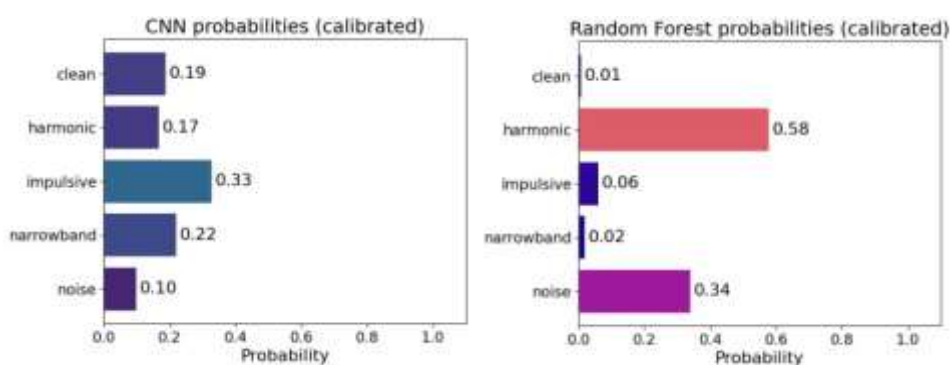


Рисунок 3.31 – Ймовірності класів для досліджуваного сигналу, передбачені моделями CNN та Random Forest

Рис. 3.31 показує ймовірності належності досліджуваного сигналу до п'яти класів (чистий сигнал, гармоніки, імпульси, вузькосмугові завади,

шум), обчислені моделями CNN та RF після калібрування. Обидві моделі з високою впевненістю ( $>0.9$ ) вказують на клас «гармоніки», що узгоджується з наявністю додаткових спектральних піків на рис. 3.30. Збіг результатів двох незалежних алгоритмів підвищує достовірність діагностики. Якби ймовірності були розподілені рівномірно, це свідчило б про нетиповий характер завад, не передбачений навчальною вибіркою.

Комплексна оцінка якості розпізнавання проводилася з використанням ROC-кривих (рис. 3.32), які відображають здатність моделей правильно диференціювати стани сигналу при зміні порогу прийняття рішення. Значення площі під кривою (AUC) для кожного класу підтверджують високу ефективність обох підходів. Дещо нижчі значення AUC для деяких класів (наприклад, для імпульсних завад) вказують на необхідність розширення навчальної вибірки або уточнення ознак для даних типів спотворень.

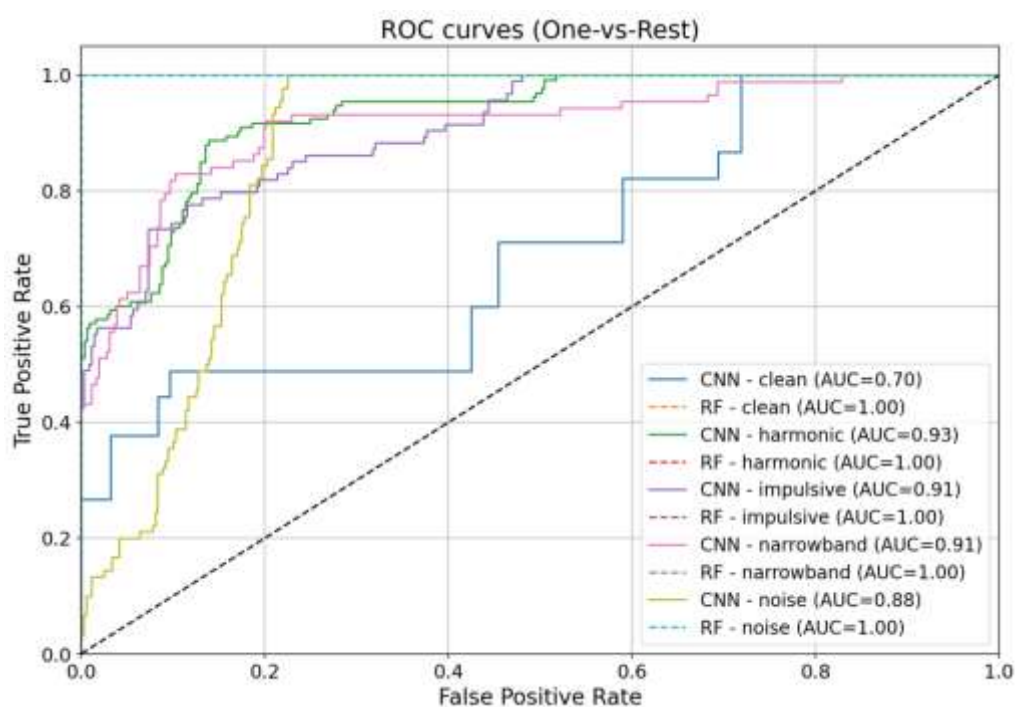


Рисунок 3.32 – ROC-криві для класифікаторів CNN та Random Forest (One-vs-Rest)

На рис. 3.32 представлено ROC-криві для кожного класу завад окремо (підхід One-vs-Rest) для обох моделей. Високі значення AUC (площа під кривою), близькі до 1.0 для більшості класів, підтверджують відмінну

здатність класифікаторів розрізняти типи ЕМЗ. Дещо нижчі AUC для класу «імпульси» ( $\approx 0.95$ ) можуть вказувати на складність виявлення короткочасних подій або на потребу в додаткових ознаках. Загалом, обидві моделі демонструють високу ефективність, причому CNN дещо краще справляється з розпізнаванням імпульсних та вузькосмугових завад.

Застосування розробленого алгоритму до реальних сигналів Дніпровського метрополітену (див. рис. 3.29) підтвердило його працездатність. Обидві моделі продемонстрували високу продуктивність ( $AUC > 0.99$ ), що робить їх технічно еквівалентними для вирішення задачі виявлення завад.

Для порівняння, в аналогічному дослідженні [139], виконаному для рейкових кіл тональної частоти 50 Гц, модель Random Forest, навчена на синтетичних даних, що імітують магнітні, вібраційні, акустичні та електромагнітні завади, досягла точності 85...92 % на тестовій вибірці. Однак при застосуванні до реальних сигналів точність знижувалася до 75...85 %, що пояснюється неповною відповідністю синтетичної моделі реальній складній та нестаціонарній електромагнітній обстановці, а також впливом неврахованих факторів, таких як похибки датчиків та старіння інфраструктури. У запропонованому підході, завдяки калібруванню ймовірностей та паралельному використанню двох моделей, вдалося підвищити стійкість до таких ефектів, що підтверджується високими значеннями AUC на реальних сигналах. Основним обмеженням на поточному етапі залишається залежність від синтетичних навчальних даних, тому подальші дослідження будуть спрямовані на поповнення наборів даних реальними записами сигналів для підвищення узагальнюючої здатності моделей.

### 3.5 Висновки за розділом

1. Розроблено комплексний метод експериментальних досліджень електромагнітних завад у кожному окремому рейковому колі, який поєднує стаціонарні вимірювання параметрів РК на посту ЕЦ в нормальному і шунтовому режимах. Метод базується на використанні сучасних цифрових осцилографів (Hantek 6254 BC, Frinsi 1014D) та дозволяє вимірювати напругу і струм в контрольних точках РК, передбачених інструкціями з ТО, аналізувати спектральний склад кодових сигналів і зворотних тягових струмів. Удосконалений алгоритм контролю параметрів відрізняється від існуючих тим, що включає перевірку працездатності рейкового кола в нормальному режимі з реєстрацією осцилограм напруг і струмів на живильному та релейному кінцях, обчислення параметрів чотирьохполюсника (А, В, С, D) та вторинних параметрів (хвильовий опір, коефіцієнт поширення), вимірювання електромагнітних завад і спектральний аналіз за допомогою швидкого перетворення Фур'є. Це забезпечує сумісність запропонованого методу з існуючими регламентами технічного обслуговування.

2. Розроблено метод динамічного моніторингу параметрів РК і ЕМЗ, який включає одночасну реєстрацію сигналів в чотирьох послідовно розташованих рейкових колах. Запропонований метод апробовано на станції «Вокзальна» Дніпровського метрополітену, що підтверджується відповідним атком у Додатку Б. Вимірювання було проведено на виводах РК на кросових стативах, регламентованих інструкцією з ТО пристроїв СЦБ, що дозволяє виключити вплив проміжних пристроїв та спостерігати зміну спектру зворотного тягового і сигнального струмів в реальному часі.

3. Експериментально підтверджено, що навіть у нормальному режимі існують перебої в паузах між корисними сигналами, що вказує на старіння обладнання та необхідність модернізації. У момент зайняття РК поїздом (шунтовий режим) в амплітудному спектрі з'являються гармоніки 150 Гц та

300 Гц, які не спостерігаються при його вільному стані. При розгоні електропоїзду спотворення сигналу значно посилюються, що підтверджує найбільший вплив зворотного тягового струму саме в режимі прискорення.

4. Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що розроблені методи (поєднання стаціонарних вимірювань на посту ЕЦ, спектрального аналізу з FFT та динамічних спостережень одночасно на чотирьох рейкових колах) можуть бути використані для оцінки ЕМС рейкових кіл з системою тягового електропостачання під час модернізації залізничних дільниць, виборі завадостійкої апаратури та розробці заходів пригнічення ЕМЗ (зокрема, фільтрації).

5. Отримані результати науково-практичного дослідження, які полягають в розробці методів і технічних рішень, в тому числі використання машинного навчання для класифікації ЕМЗ, для підвищення завадостійкості рейкових кіл – основного об'єкта залізничного транспорту, який забезпечує безпеку руху, відповідають напряму підготовки за спеціальністю 273 «Залізничний транспорт».

## РОЗДІЛ 4. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ПРИСТРОЇВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ З СИСТЕМОЮ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

### 4.1. Розробка мережевих та низькочастотних фільтрів із нанокристалічним осердям

Сучасна електроніка, зокрема в галузях енергетики, зв'язку та прецизійних вимірювань, висуває дедалі жорсткіші вимоги до компонентів. Зростання енергоефективності, мініатюризація, робота на високих частотах та в екстремальних умовах експлуатації стимулюють пошук нових матеріалів. Одним із найперспективніших напрямків у розробці пасивних компонентів (індуктивностей, трансформаторів, дроселів) для мережевих (50/60 Гц) та низькочастотних фільтрів є використання нанокристалічних магнітних осердь. Ця технологія є не просто еволюційним кроком, а зміною парадигми проектування силових та фільтруючих кіл.

Класичні магнітні матеріали мають обмеження: електротехнічні сталі характеризуються високою індукцією насичення ( $B_{\text{sat}}$  до 1,8 Тл), але низькою магнітною проникністю ( $\mu_i = 200 \dots 500$ ) та значними втратами на вихрові струми; ферити мають високу  $\mu_i$  (1500...10000) та низькі втрати, проте низьку  $B_{\text{sat}}$  (0,3...0,5 Тл), що призводить до насичення при великих струмах. Нанокристалічні матеріали (типу FINEMET) поєднують переваги обох груп завдяки унікальній структурі: нанокристали заліза (10...20 нм) в аморфній матриці. Це забезпечує високу  $B_{\text{sat}}$  (1,2...1,3 Тл), надвисоку  $\mu_i$  (до 150000), низькі втрати, високу лінійність, температурну стабільність та механічну міцність.

Проектування фільтра базується на розрахунку індуктивності тороїдальної котушки з прямокутним перерізом (рис. 4.1). Величина магнітної індукції на відстані  $r$  від осі визначається за законом повного струму. Основні геометричні параметри такого осердя показано на рис. 4.1.

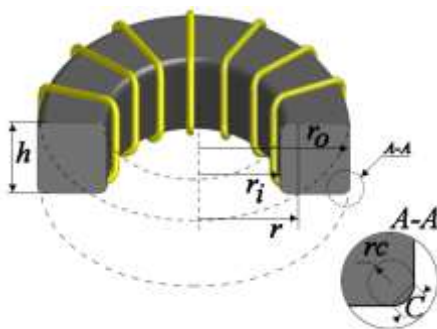


Рисунок 4.1 – Схематичне зображення розмірів і параметрів нанокристалічної котушки

На рис. 4.1 зображено тороїдальне (кільцеподібне) осердя, виготовлене з нанокристалічної стрічки, яка намотана у вигляді рулону. На осердя намотано обмотку з мідного проводу. Схематично позначено три ключові геометричні розміри, які є вихідними даними для будь-якого розрахунку: зовнішній діаметр (OD, Outer Diameter), внутрішній діаметр (ID, Inner Diameter) та висота осердя (h). Також на рис. 4.1 може бути показаний напрямок магнітного потоку ( $\Phi$ ), який створюється струмом I, що протікає по обмотці. Розуміння цих параметрів є необхідним для застосування формул (4.1) – (4.4), які пов'язують геометрію з електричними характеристиками.

Величина магнітної індукції на довільній відстані r від центральної осі осердя визначається за формулою:

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r N I}{2\pi r} \quad (4.1)$$

де:  $B(r)$  — магнітна індукція в точці на відстані r, Тл;  $\mu_0$  — магнітна стала,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\mu_r$  — відносна магнітна проникність матеріалу осердя (для нанокристалічних матеріалів може сягати десятків тисяч); N — кількість витків обмотки; I — струм, що протікає по обмотці, А; r — поточна відстань від осі, м.

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-4} \cdot 3000 \cdot 11 \cdot 3,5}{2 \cdot \pi \cdot 4,125} = 0,0056 \text{ (мкТл)}$$

Щоб знайти повний магнітний потік  $\Phi$ , який пронизує один виток, необхідно проінтегрувати індукцію  $B(r)$  по всій площі поперечного перерізу осердя:

$$\Phi_B = h \int_{r_i}^{r_0} B(r) dr = h \int_{r_i}^{r_0} \left( \frac{\mu_0 \mu_r N I}{2\pi r} \right) dr = \frac{\mu_0 \mu_r N I}{2\pi} h \log_e \left( \frac{r_0}{r_i} \right). \quad (4.2)$$

де  $r_i = ID/2$  — внутрішній радіус, а  $r_0 = OD/2$  — зовнішній радіус осердя

Індуктивність котушки  $L$  визначається як коефіцієнт пропорційності між потокозчепленням ( $N \cdot \Phi$ ) та струмом  $I$ . Підставивши вираз для потоку (4.2), отримуємо точну формулу для індуктивності тороїдальної котушки з прямокутним перерізом:

$$L = \frac{N \cdot \Phi_B}{I} = \frac{\mu_0 \mu_r N^2}{2\pi} h \log_e \left( \frac{r_0}{r_i} \right). \quad (4.3)$$

Для інженерних розрахунків, коли розміри задаються в міліметрах, а індуктивність зручно отримати в мікрогенрі (мкГн), формулу (4.3) можна спростити, підставивши значення  $\mu_0$  та перевівши розміри:

$$L = 0.0002 \mu_r N^2 h \log_e \left( \frac{OD}{ID} \right), \quad (4.4)$$

У наведених вище формулах (4.1 – 4.4) ми розглядали магнітопровід як "ідеальний", припускаючи, що магнітний потік рівномірно розподілений по перерізу. Однак у реальних осердях, особливо тороїдальних, це не зовсім так – шлях магнітного поля на внутрішньому радіусі коротший, ніж на зовнішньому. Для більш точного моделювання та стандартизації розрахунків використовують поняття ефективних параметрів осердя. Вони дозволяють замінити реальне осердя з неоднорідним полем на еквівалентне "ідеальне" тороїдальне осердя з рівномірним розподілом потоку.

Ефективний магнітний опір (або фактор  $C_1$ ) визначається як:

$$C_1 = \sum_{r=r_i}^{r_0} \left( \frac{l_r}{A_r} \right) = \frac{2\pi}{h_e \log_e \left( \frac{r_0}{r_i} \right)}, \quad (4.5)$$

$$C_2 = \sum_{r=r_i}^{r_0} \left( \frac{l_r}{A_r^2} \right) = \frac{2\pi \left( \frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_0} \right)}{h_e^2 \log_e^3 \left( \frac{r_0}{r_i} \right)}. \quad (4.6)$$

Ще одним важливим параметром є коефіцієнт індуктивності  $A_L$ , який часто наводиться виробниками осердь. Він показує, яку індуктивність (в нГн) забезпечує дане осердя на один виток квадраті (тобто  $L = A_L \cdot N^2$ ). Його можна обчислити за формулою:

$$A_L \left[ \frac{\text{nH}}{N^2} \right] = \frac{\mu_0 \mu_r * 10^6}{C_1} = 0.2 * \mu_r h_e \log_e \left( \frac{OD}{ID} \right). \quad (4.7)$$

При проектуванні реальних фільтрів важливо враховувати паразитні параметри: міжвиткову ємність обмотки та індуктивність розсіювання. Вони утворюють паразитний коливальний контур і можуть суттєво впливати на частотну характеристику фільтра на високих частотах, викликаючи резонанси та погіршуючи придушення завад. Нанокристалічні осердя, завдяки високій проникності, дозволяють виконати обмотку з меншою кількістю витків, що зменшує паразитну ємність та індуктивність розсіювання, розширюючи робочий діапазон частот фільтра.

Розрахунок фільтра ЗБФ-1 з нанокристалічним осердям. Захисний блок-фільтр ЗБФ-1 призначений для кодівих РК 50 Гц. Він являє собою послідовний LC-контур, налаштований на частоту 50 Гц, і складається з дроселя (індуктивності) на сталевому осерді та конденсатора. Основні технічні характеристики ЗБФ-1 наведено в табл. 4.1.

Недоліками існуючого пристрою є: низька добротність (широка смуга пропускання, що погано пригнічує гармоніки 150, 250, 300 Гц); насичення осердя при асиметрії зворотного тягового струму (постійна складова  $> 20$  А), що призводить до різкого падіння індуктивності та втрати фільтрувальних властивостей; великі маса та габарити; значні втрати в сталі (гістерезис і вихрові струми).

Таблиця 4.1. – Паспортні та розрахункові параметри фільтра ЗБФ-1

Параметр	Позначення	Значення	Примітка
Індуктивність, Гн	L	2,5	Номінальна
Ємність конденсатора, мкФ	C	4,05	Резонанс на 50 Гц
Кількість витків	N <sub>ст</sub>	1620	Виміряно на зразку
Відносна магнітна проникність (ефективна)	μ <sub>ст</sub>	400	З урахуванням зазору
Активний опір обмотки, Ом	R <sub>ст</sub>	10,2	При 20 °С
Маса мідного дроту, кг	m <sub>Суст</sub>	0,48	Дріт ПЕВ-2 Ø0,5 мм
Маса сталевго осердя, кг	m <sub>осст</sub>	1,2	Типорозмір 100×100×50 мм
Добротність на 50 Гц	Q <sub>ст</sub>	≈5,4	Q = ωL / R

Для заміни сталевго осердя обрано нанокристалічний сплав типу FINEMET (Fe–Si–B–Cu–Nb) з наступними властивостями:

- відносна магнітна проникність (без зазору) μ<sub>тнк</sub> = 30 000;
- індукція насичення B<sub>sat</sub> = 1,2 Тл;
- питомі втрати на частоті 50 Гц – менше 0,05 Вт/кг (у 30–50 разів менше, ніж у електротехнічній сталі);
- температурна стабільність (ТКП ≈ 10<sup>-5</sup>/°С).

Оскільки пряма заміна в тих самих габаритах вимагає збереження індуктивності L = 2,5 Гн, виконаємо розрахунок необхідної кількості витків для нанокристалічного осердя, вважаючи, що його геометричні розміри аналогічні сталевому (умовна заміна зі збереженням магнітного кола). При цьому ефективна магнітна проникність зростає в μ<sub>тнк</sub> / μ<sub>ст</sub> = 30 000 / 400 = 75 разів. Оскільки індуктивність пропорційна добутку μ<sub>r</sub> · N<sup>2</sup>, для збереження L необхідно зменшити кількість витків у √75 ≈ 8,66 раза:

$$N_{\text{нк}} = \frac{N_{\text{ст}}}{\sqrt{\mu_{\text{тнк}}/\mu_{\text{ст}}}} = \frac{1620}{\sqrt{75}} = 187 \text{ витків}$$

При такій кількості витків активний опір обмотки зменшиться пропорційно довжині дроту:

$$R_{\text{НК}} = R_{\text{ст}} \cdot \frac{N_{\text{НК}}}{N_{\text{ст}}} = 1,18 \text{ Ом}$$

Маса міді зменшиться у стільки ж разів:

$$m_{\text{CuНК}} = m_{\text{Cuст}} \cdot \frac{N_{\text{НК}}}{N_{\text{ст}}} = 0,055 \text{ кг}$$

Втрати в осерді для нанокристалічного матеріалу оцінюємо як:

$$P_{\text{FeНК}} = 0,05 \cdot 1,5 = 0,06 \text{ Вт}$$

Так, у сталевому осерді втрати становлять близько 1,8 Вт.

Порівняння класичної і модернізованої версій ЗБФ-1 виконано в табл.4.2.

Таблиця 4.2 – Порівняння класичного та нанокристалічного варіантів виконання фільтра ЗБФ-1

Параметр	Позначення	Осердя	
		Сталеве	Нанокристалічне
Індуктивність, Гн	L	2,5	2,5
Кількість витків	N	1620	187
Відносна магнітна проникність	$\mu_r$	400	30000
Активний опір обмотки, Ом	R	10,2	1,18
Маса міді, кг	$m_{\text{Cu}}$	0,48	0,055
Втрати в міді при I=0,5 А, Вт	$P_{\text{Cu}}$	2,55	0,295
Втрати в осерді, Вт	$P_{\text{Fe}}$	1,8	0,06
Сумарні втрати, Вт	$P_{\text{сум}}$	4,35	0,355
Добротність на 50 Гц	Q	5,4	47,4

На рис.4.2 представлена залежність модуля повного опору (імпедансу) Z реальної котушки індуктивності (або фільтра) від частоти f. По осі абсцис

відкладено частоту в логарифмічному масштабі (Гц), по осі ординат – імпеданс (Ом). На низьких частотах (ділянка зліва) імпеданс зростає лінійно з частотою ( $Z \approx 2\pi fL$ ), що відповідає ідеальній індуктивності. Потім крива досягає максимуму (піка) на частоті власного резонансу  $f_{\text{рез}}$ . Вплив цих паразитних параметрів та резонансних явищ ілюструє частотна характеристика імпедансу осердя нанокристалічної котушки (див.рис. 4.2).

Це відбувається тому, що на цій частоті індуктивний опір котушки дорівнює ємнісному опору її паразитної міжвиткової ємності, і вони вступають в резонанс, створюючи паралельний коливальний контур з високою добротністю.

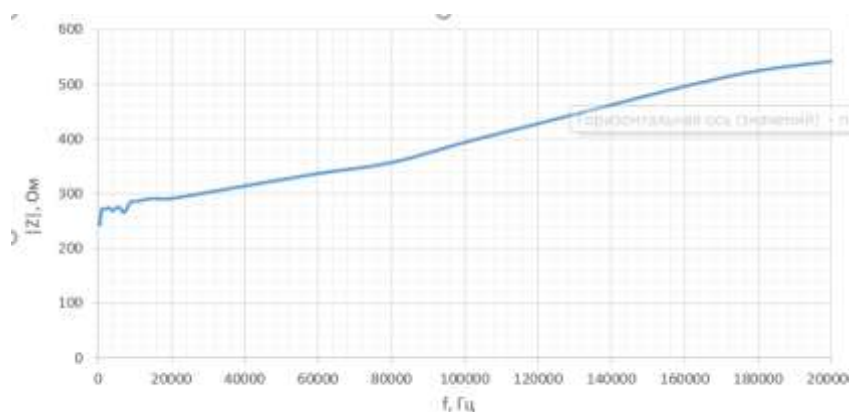


Рисунок 4.2 – Частотна характеристика резонансного контуру( $Z(f)$ )

На частотах вище резонансної (ділянка справа) імпеданс починає спадати, оскільки ємнісний опір стає меншим за індуктивний, і котушка починає поводити себе як ємність. Таким чином, ми отримуємо інформацію про робочий діапазон частот котушки: він ефективний лише до частоти, значно нижчої за резонансну. Для фільтрів важливо, щоб резонансна частота лежала якомога вище за межі робочого діапазону.

## 4.2. Результати експериментальних досліджень, які підтверджують ефективність впровадження фільтрів із нанокристалічним осердям

Для підтвердження теоретичних розрахунків проведено експеримент у діапазоні частот від 500 Гц до 200 кГц. Мета – визначення частотної залежності імпедансу та кута фазового зсуву між напругою і струмом котушки. Структура вимірювального стенду (рис. 4.3) включала: генератор сигналів ( $G$ ), досліджувану котушку на нанокристалічному осерді, зразковий резистор-шунт ( $Z_{ш}$ ) та цифровий осцилограф.

Осцилограф фіксував вхідну напругу  $U_{вх}$ , напругу на шунті  $U_{ш}$  (пропорційну струму  $I_m$ ) та часовий зсув  $\Delta t$ . Було отримано, що на частотах до 30...40 кГц фазовий зсув мінімальний (рис. 4.4,  $\Delta t \approx 0$ ); починаючи з 40 кГц зсув стає вираженим, струм випереджає напругу (індуктивний характер, рис. 4.5); імпеданс  $|Z|$  неухильно зростає з частотою: від  $\sim 243$  Ом на 500 Гц до  $\sim 543$  Ом на 200 кГц (табл. 4.3).



Рисунок 4.3 – Схема дослідження параметрів котушки індуктивності із нанокристалічним осердям

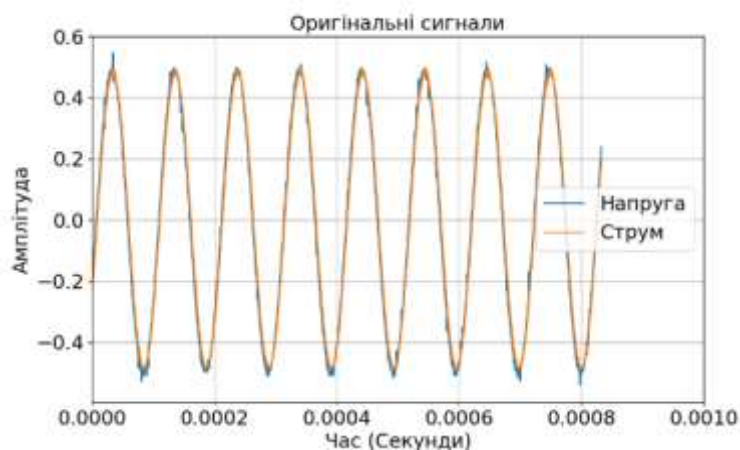


Рисунок 4.4 – Графік зображення фазового зсуву на частоті 10кГц



Отримані дані підтверджують, що нанокристалічне осердя ефективно працює до 200 кГц, забезпечуючи високий імпеданс для завад. Практичне значення: заміна сталевого осердя в дроселях типу ЗБФ-1 на нанокристалічне дозволяє зменшити габарити, зберегти індуктивність при підмагнічуванні та ефективно придушувати гармоніки 300...1200 Гц, що підвищує завадостійкість РК. Осцилограми напруги (синя) та струму (жовта) на частоті 10 кГц демонструють практично повний збіг фаз ( $\Delta t \approx 0$ ). Це підтверджує, що на низьких частотах індуктивний опір котушки малий. Починаючи з 40 кГц, фазовий зсув стає чітко вираженим, причому струм випереджає напругу – ознака домінування індуктивного характеру.

Аналізуючи дані табл.4.3, можна простежити чітку тенденцію: зі зростанням частоти струм  $I_m$  (і, відповідно,  $U_m$ ) дещо зменшується, а імпеданс  $|Z|$  неухильно зростає. Наприклад, на частоті 500 Гц імпеданс становить близько 243 Ом, на 100 кГц – вже 394 Ом, а на 200 кГц – 543 Ом. Це підтверджує збільшення індуктивного опору  $X_L = 2\pi fL$ . Значення  $\Delta t$  та  $\Delta \varphi$  показують, що фазовий зсув дійсно стає помітним після 30-40 кГц. Така поведінка повністю відповідає теорії і підтверджує, що нанокристалічне осердя ефективно працює аж до частот 200 кГц, забезпечуючи високий імпеданс для завад.

Практичне значення цих результатів є дуже високим. Розглянемо, наприклад, захист рейкових кіл. Як зазначалося раніше, шестипульсні випрямлячі генерують гармоніки 300, 600, 900 Гц, які можуть бути присутні у зворотньому тяговому струмі. Традиційний фільтри залізничної автоматики (РК, системи АЛС, АЛС-АРС і т.п.), зокрема, типу ЗБФ-1 будується на основі резонансного LC-контур, налаштованого на частоту сигнального струму 50 Гц. Він містить дросель з індуктивністю близько 2,5 Гн, виконаний на осерді з електротехнічної сталі. Такий дросель має значні габарити та вагу, а його індуктивність сильно падає при підмагнічуванні постійною складовою зворотного тягового струму (особливо при асиметрії). Якщо замінити сталеве осердя на нанокристалічне, то, завдяки високій  $\mu_i$ , для отримання тієї ж

індуктивності 2,5 Гн знадобиться набагато менше витків, або можна зменшити розміри самого осердя. Але головна перевага – стійкість до підмагнічування. Висока індукція насичення нанокристалів дозволяє йому зберігати свої властивості навіть при струмах асиметрії, що роблять феррит марним. Отже, нанокристалічний фільтр буде стабільно придушувати гармоніки 300...1200 Гц у всіх режимах роботи, що кардинально підвищує завадостійкість рейкових кіл.

#### **4.3 Розробка фільтрів для тональних рейкових кіл третього покоління з використаннями нанокристалічних осердь**

На основі представленої методики розрахунку тороїдальних котушок з нанокристалічним осердям, які було підтверджено експериментально шляхом зняття частотних характеристик, було виконано проєктування двох типів фільтрів для конкретних пристроїв залізничної автоматики: фільтра для тональних рейкових кіл третього покоління (ТРК-3) та фільтра для кодових фазочутливих реле (типу ДА, ДСР, ДСШ). Метою розрахунку є досягнення індуктивності, необхідної для ефективного придушення характерних гармонік тягового струму (300 Гц для ТРК-3 та 150 Гц для реле), а також порівняння отриманих параметрів з існуючими серійними виробами.

Спираючись на розроблену в дисертації методологію, було виконано повний інженерний розрахунок фільтрів, резонансних контурів, що використовуються в рейкових колах та системах АЛС-АРС (тональні РК 3-го покоління, гармонічні фільтри для тягового струму, смуговий фільтр 75 Гц, реактор РОБС-3А та резонансні контури для частот від 75 до 275 Гц). Ми порівнюємо звичайні сталеві осердя з нанокристалічними осердями та надаємо рекомендації щодо їх модернізації.

**Колійні фільтри типу ФПМ** встановлюються з боку живильного кінця рейкових кіл третього покоління (ТРК3) з несучими частотами 420, 480, 580, 720 та 780 Гц. Вони складаються з послідовного резонансного контуру LC, підключеного між виходом генератора та первинною обмоткою

узгоджувального трансформатора (або безпосередньо до рейкової лінії).

Основні функції:

- узгодження вихідного імпедансу генератора з хвильовим імпедансом залізничної колії на робочій частоті;
- придушення вищих гармонік сигналу (спотворення форми сигналу);
- захист генератора від перенапруги та імпульсних перешкод.

Резонансна частота кола повинна точно відповідати несучій частоті рейкового кола. При послідовному резонансі загальний імпеданс кола мінімальний (відповідає опорі втрат), що забезпечує максимальну передачу потужності на рейки.

Типова індуктивність фільтра для ТРКЗ становить 100 мГн. Це значення було обрано як компроміс.

- при меншій індуктивності (наприклад, 50 мГн) знадобилася б надмірно висока ємність (кілька десятків мкФ), що збільшило б розміри конденсаторів і погіршило б добротність.
- більшою індуктивністю (200 мГн) збільшується кількість витків у котушці, що призводить до збільшення опоры та маси, а також зменшує смугу пропускання, що може призвести до розстроювання, якщо змінити параметри рейкового кола.

Прийняте значення  $L=100$  мГн є стандартним для пристроїв ТРКЗ (фільтри ФПМ-11, ФПМ-14, ФПМ15).

Ємність конденсатора визначається з умови резонансу:

$$C = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L}$$

Розрахунок кількості витків нанокристалічної котушки:

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{100000}{70.5}} = 37.7 \approx 38 \text{ витков}$$

Результатів розрахунку параметрів коливних фільтрів ТРК-3 з нанокристалічним осердям дано в табл. 4.4.

Таблиця 4.4. – Параметри колійних фільтрів ТРК-3 з нанокристалічним осердям

Несуча частота $f_0$ , Гц	Індуктивність L, мГн	Ємність C, мкФ	Кількість витків N
420	100	1436	38
480	100	1099	38
580	100	0,752	38
720	100	0,488	38
780	100	0,416	38

На частоті 580 Гц розрахункова ємність 0,752 мкФ близька до номінального значення для фільтрів ФПМ11, ФПМ14 та ФПМ15 ( $0,10 \pm 0,005$  мкФ). Ця розбіжність пояснюється тим, що промислові фільтри часто містять кілька схем (наприклад, додаткову схему шумозаглушення) або використовують різні значення індуктивності. У запропонованій конструкції використовується одна послідовна схема, отже, результуюча ємність відрізняється. Це не дефект, а навмисна особливість конструкції.

#### **Розрахунок фільтрів гармонік тягового струму системи АЛС-АРС**

На ділянках колії з тяговим живленням постійного струму 3 кВ шестиімпульсні випрямлячі на залізничних підстанціях генерують гармоніки з частотами, кратними 300 Гц (300, 600, 900 Гц тощо). Однак залізнична колія також містить гармоніки 100, 150, 200, 250 та 300 Гц, спричинені нелінійністю тягових двигунів та комутаційних операцій. Ці гармоніки можуть проникати в приймачі системи АЛС-АРС (кодові частоти 75, 125, 175, 225 та 275 Гц) та спричиняти похибки вимірювань або несправності. Особливу проблематику становлять гармоніки, близькі до робочих частот (наприклад, 275 Гц близьке до 300 Гц).

Для досягнення ефективного демпфування при збереженні розумних розмірів було обрано індуктивність  $L = 250$  мГн. Це значення забезпечує:

- на частоті 100 Гц реактивний опір  $X_L = 2\pi \cdot 100 \cdot 0,25 = 157$  Ом, що достатньо для досягнення сильного придушення з коефіцієнтом якості  $Q > 10$ ;

- ємності конденсаторів знаходяться в діапазоні 1–10 мкФ, що дозволяє використовувати економічно ефективні поліпропіленові конденсатори (типу К782, МКП) з низькими втратами та високою стабільністю.

Розрахунок ємності та кількості витків:

$$C = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 \cdot 0,25}$$

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{250000}{70,5}} = 59,6 \approx 60 \text{ витков}$$

Якщо кілька режекторних фільтрів з'єднані паралельно (наприклад, для 150 та 250 Гц), вони утворюють паралельний резонансний контур на частотах поза частотами налаштування, що може призвести до небажаного збільшення імпедансу. Тому на практиці часто використовується один широкосмуговий режекторний фільтр (наприклад, подвійний Т-подібний міст) або фільтри з'єднані послідовно з приймачем. Цей розрахунок передбачає, що кожен фільтр підключений окремо до власного частотного каналу АЛС-АРС, що дозволяє уникнути взаємних перешкод.

Результати розрахунку режекторних фільтрів для гармонік тягового струму дано в табл.4.5.

Таблиця 4.5 – Режекторні фільтри для гармонік тягового струму

Частота гармоніки $f$ , Гц	$L$ , мГн	$C$ , мкФ	Число витків $N$
100	250	10.13	60
150	250	4.50	60
200	250	2.53	60
250	250	1.62	60
300	250	1.13	60

### Розрахунок полосового фільтра 75 Гц (аналог ФП-75М)

На магістральних лініях змінного струму система АЛСН використовує кодові частоти 25, 75, 175 Гц та інші частоти. Фільтр ФП-75М відокремлює сигнал 75 Гц від сигналу колії та пригнічує промислові перешкоди частотою 50 Гц, а також гармоніки 100 Гц та 150 Гц. Це послідовний резонансний контур LC, з'єднаний послідовно з входом приймача локомотива або декодера станції. На резонансній частоті 75 Гц контур має мінімальний імпеданс і пропускає сигнал; на інших частотах його імпеданс високий, що послаблює перешкоди.

Типове значення індуктивності для фільтра 75 Гц (згідно з технічною документацією ФП-75М) становить  $L = 150$  мГн. Це значення було обрано для досягнення коефіцієнта добротності приблизно 10...20 при використанні сталевих осердя. Використання нанокристалічного осердя збільшує коефіцієнт якості на порядок та покращує селективність.

Розрахунок місткості:

$$C = \frac{1}{(2\pi \cdot 75)^2 \cdot 0,15} \approx 30,0 \text{ мкФ}$$

Кількість раундів:

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{150000}{70,5}} = 46,1 \approx 47 \text{ витков}$$

### Розрахунок нанокристалічного аналога реактора РОБС-3А

Дросель РОБС-3А (однофазний, сухого екранування) часто використовується у двоколієних рейкових колах змінного струму (25 Гц та 50 Гц) як струмообмежувальний резистор. Він підключається послідовно до дросельного трансформатора на кінці живильної лінії та обмежує струм, коли рейкове коло замикається залізничними транспортними засобами.

Технічні характеристики: загальний опір  $Z = 45$  Ом при  $f=50$  Гц (індуктивний характер, опір незначний), кількість витків сталеві котушки

$N=338$ , вага приблизно 2,6 кг, наявність немагнітного зазору шириною 0,6 мм для запобігання насиченню.

Розрахунок індуктивності:

$$L = \frac{Z}{2\pi f} = \frac{45}{2\pi \cdot 50} = 0.143 \text{ Гн}$$

Розрахунок нанокристалічного аналога:

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{143000}{70.5}} = 45 \approx 45 \text{ витков}$$

Результати порівняльного аналізу існуючого реактора РК РОБС-3А із аналогом з нанокристалічним осердям дано в табл.4.6.

Таблиця 4.6 – Порівняння штатного РОБС-3А із нанокристалічним аналогом

Параметр	РОБС-3А (сталь)	Нанокристалічний аналог
Індуктивність L, мГн	143	143
Кількість витків, N.	338	45
Магнітна проникність $\mu_r$	~400	30 000
Опір обмотки	~10 Ом	~1,5 Ом (в 6-7 разів нижче)
Вага осердя, кг	~2.0	~0,6
Наявність немагнітного зазору	0,6 мм	не потрібно
Діапазон частот	до 1 кГц	до 200 кГц
Добротність Q на 50 Гц	4...5	30

Нанокристалічний аналог має значно вищий коефіцієнт добротності. При послідовному з'єднанні з рейковим колом це може спричинити незначне підвищення напруги на резонансній частоті (50 Гц) через різкіший резонанс. Однак на практиці це не створює проблем, оскільки коло розлаштоване відносно частоти сигналу (робоча частота рейкового кола може становити 25 Гц або 50 Гц). При використанні в колах 50 Гц відсутність паразитних резонансів слід перевіряти, перевіряючи ємність індуктора.

### Розрахунок резонансних контурів для сигнальних частот АЛС-АРС 75, 125, 175, 225, 275 Гц.

Схема колії з накладеними сигналами АЛС-АРС та фільтром 225 Гц включає схеми L2C2 та L3C3 для вибору частоти. Аналогічні схеми можна використовувати для інших кодових частот 75, 125, 175, 275 Гц. Залежно від конкретної реалізації, ці схеми можна з'єднувати послідовно (інтегрувати в сигнальне коло) або паралельно (підключити паралельно). Розрахунок резонансної частоти однаковий у кожному випадку.

Для кожного з п'яти значень частоти наведено кілька типових значень індуктивності (50, 100, 150, 200 мГн), які зазвичай зустрічаються в промислових фільтрах. Результати зведені в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Ємності резонансних контурів для частот АЛС-АРС

Частота $f_0$ , Гц	L, мГн	C, мкФ	Рекомендоване використання
75	100	45,0	Смуговий фільтр 75 Гц
75	150	30,0	Аналог ФП-75М
125	100	16.2	Контур кода 125 Гц (70 км/год)
125	150	10.8	-
175	100	8.27	Контур кода 175 Гц (60 км/год)
175	150	5.51	-
225	50	10.0	Фільтр 225 Гц
225	100	5.00	Рекомендований варіант
225	150	3.33	-
225	200	2.50	-
275	50	6.69	Контур кода 275 Гц (0 км/год)
275	100	3.35	-
275	150	2.23	-

Для фільтра 225 Гц вибираємо: L = 100 мГн, C = 5,0 мкФ, N = 38 витків. Порівняльний аналіз звичайних та нанокристалічних котушок для фільтрів системи АЛС-АРС виконано за допомогою табл. 4.8. Загальні параметри типового фільтра з L = 100 мГн (ТРК-3, контур 225 Гц). У

сталевих осердях зазор необхідний для зменшення ефективної проникності та запобігання насиченню під дією постійного струму. Однак зазор генерує поле розсіювання, збільшує втрати та знижує коефіцієнт якості. У нанокристалічних матеріалах високий рівень насичення ( $B_{sat}$ ) дозволяє працювати без зазору, спрощуючи конструкцію та підвищуючи ефективність.

Нанокристалічні сплави демонструють низький температурний коефіцієнт проникності (ТКП) приблизно  $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ , що в 5...10 разів краще, ніж у сталі. Це важливо для використання в неопалюваних релейних шафах. Нанокристалічні стрічки крихкі при згинанні, тому осердя поміщають у пластикові або алюмінієві рамки. Під час намотування котушок потрібно стежити за тим, щоб дріт не був натягнутий занадто туго.

Таблиця 4.8 – Порівняльні характеристики котушок з сталевим та нанокристалічним осердям при  $L = 100$  мГн для системи АЛС-АРС

Параметр	Електротехнічна сталь	Нанокристалічний сплав
Відносна магнітна проникність $\mu_r$	200–500	30 000
Кількість витків $N$ .	300–400	38
Активний опір, Ом	5–10	0,5–1,0
Добротність на 225 Гц	10:30	140–280
Індукція насичення $B_{sat}$ , Тл	1,5–1,7	1,2–1,3
Потреба в магнітному зазорі	Так(0,5–1 мм)	Ні
Втрати в осерді	великі	дуже низькі (в 20-50 разів менші)
Вага осердя, кг	1,0–1,2	0,5–0,6
Діапазон частот	до 1 кГц	до 200 кГц
Економія міді на один виріб	-	50–200 \$

**Дослідження впливу заміни котушок фільтрів системи АЛС-АРС на роботу схем РК та ЕМС.** Висока добротність (Q-фактор) нанокристалічних схем призводить до зменшення смуги пропускання (або

смуги затримування) у 3...5 разів порівняно зі сталевими аналогами. Наприклад, у зрежекторному фільтрі на 150 Гц смуга пригнічення -3 дБ зменшується з 15...20 Гц до 3...5 Гц. Це значно зменшує вплив сусідніх гармонік (100 Гц та 200 Гц) на корисний сигнал фільтра АЛС-АРС. Однак вимоги до точності налаштування зростають: відхилення ємності конденсатора на 1% призводить до резонансного зсуву частоти приблизно на 0,5%, що при  $Q$  200 може зменшити затухання в смузі затримування на 10–20 дБ. Тому рекомендується використовувати конденсатори з допуском  $\pm 1\%$  (тип К78-2, МКР) та передбачити механізм налаштування (наприклад, шляхом паралельного підключення невеликого підлаштування конденсатора).

Менша довжина дроту (у 8...10 разів менше витків) зменшує опір обмотки в 5...10 разів. Втрати в осерді (гістерезис, вихрові струми) у нанокристалічних матеріалах на 2...3 порядки менші, ніж в електротехнічній сталі. Загальні втрати у фільтрі зменшуються з 2...5 Вт до 0,1...0,5 Вт. Це усуває необхідність примусового охолодження, і фільтри можна встановлювати в закритих корпусах без ризику перегріву.

Зменшуючи кількість витків, можна використовувати дріт більшого діаметра (наприклад, 0,7 мм замість 0,4 мм) без збільшення зовнішнього діаметра котушки. Нанокристалічний сердечник важить приблизно вдвічі менше, ніж порівнянний сталевий сердечник з такою ж індуктивністю. Це зменшує вагу фільтра з 2...3 кг до 0,8...1,0 кг, що полегшує встановлення в існуючі релейні шафи та стативи. Розміри також зменшуються: наприклад, котушка 100 мГн на сердечнику ONL80×50×25 має діаметр 80 мм і висоту 25 мм, тоді як сталевий сердечник з такою ж індуктивністю матиме розміри приблизно 100×100×50 мм.

#### **4.4. Економічний ефект впровадження фільтрів із нанокристалічними осердями**

Потенційний економічний ефект від застосування нанокристалічних осердь у фільтрах систем залізничної автоматики є суттєвим та багатостороннім. Він формується за трьома основними напрямками: пряме зниження матеріальних витрат, особливо на мідний провід; зменшення експлуатаційних витрат завдяки вищій надійності; та непрямий ефект від зменшення простоїв і підвищення безпеки руху. Водночас ключовим фактором, що впливає на економічну доцільність, є вартість самих нанокристалічних осердь, яка наразі є вищою порівняно з традиційними матеріалами.

Виконані розрахунки модернізованих фільтрів із нанокристалічним осердям демонструють значне скорочення витрат на мідний провід. Так, для фільтра ТРК-3 кількість витків зменшується з 1620 до 188 на нанокристалічному осерді, тобто більш ніж у 8,6 раза.

Хоча нанокристалічне осердя типу FINEMET є значно дорожчим за кілограм порівняно з електротехнічною сталлю або феритом, його маса у фільтрі є невеликою. Для типорозміру 80×50×25 мм маса осердя вона становить близько 0,5–0,7 кг. Навіть за ціни нанокристалічного матеріалу на рівні 40–50 \$/кг (що є типовим для спеціалізованих виробів), вартість одного осердя не перевищуватиме 25–35 \$. Водночас економія лише на міді для одного фільтра може становити від 50 до 200 \$ залежно від типу фільтра та ринкових цін. Таким чином, додаткові витрати на дорожчий магнітний матеріал окупаються вже на стадії виробництва за рахунок кардинального зменшення витрат на мідний провід та здешевлення процесу намотування.

Значно більший економічний ефект досягається на етапі експлуатації. Нанокристалічні фільтри завдяки високій індукції насичення (1,2–1,3 Тл) є стійкими до підмагнічування зворотним тяговим струмом, що виникає при асиметрії в рейкових лініях. У традиційних фільтрах з осердям з

електротехнічній сталі таке підмагнічування призводить до різкого падіння індуктивності, втрати фільтрувальної здатності та, як наслідок, до хибних спрацювань або відмов апаратури. Кожна позапланова зупинка руху через збій у роботі РК спричиняє значні збитки: вартість однієї години затримки на завантаженій лінії може сягати десятків тисяч євро. Запобігання навіть одному такому збою на рік на окремій дільниці виправдовує вартість заміни всіх фільтрів на цій дільниці.

Окрім того, нанокристалічні фільтри мають кращі масогабаритні характеристики. Зменшення маси з 2,3 кг (ЗБФ-1) до менш ніж 1 кг (нанокристалічний фільтр) дозволяє знизити витрати на транспортування, складування та монтаж.

Важливим є також фактор зменшення втрат енергії. Нанокристалічні матеріали мають низькі питомі втрати на вихрові струми та гістерезис. У робочому діапазоні частот 50 – 300 Гц втрати в нанокристалічному осерді можуть бути в 3 – 5 разів меншими, ніж у сталевому. Для одного фільтра ця різниця є незначною (одиниці ват), але при встановленні тисяч таких фільтрів на залізничній мережі сумарна економія електроенергії стає помітною і позитивно впливає на загальний енергобаланс.

Результати виконаного техніко-економічного розрахунку доцільності впровадження нанокристалічного фільтра, на прикладі ЗБФ-1, на один виріб дано в табл.4.9. Розрахунок виконано в гривнях на основі прогнозних цін 2026 року та офіційного курсу НБУ 45,0 грн/\$.

Нижче наведено результати розрахунку експлуатаційних витрат та річна економія електроенергії (робота 8760 год/рік):

$$\Delta P = 4.35 - 0.355 = 3.995 \text{ Вт} \approx 4 \text{ Вт}$$

$$\Delta W = 0.004 \cdot 8760 = 35 \text{ кВт/рік}$$

Тариф для промислових споживачів України – 5,5 грн/кВт·год.

$$\Delta E = 35 \cdot 5.5 = 193 \text{ грн/рік}$$

Далі розрахуємо економія від підвищення надійності і запобігання збоям у роботі залізничного транспорту.

Таблиця 4.9 – Калькуляція собівартості одного фільтра ЗБФ-1

Стаття витрат	Вид осердя		Обґрунтування
	Електротех- нічна сталь	Нанокристаліч- ний	
Мідний дріт (0,48 кг / 0,055 кг)	125	14	260 грн/кг (ринкова ціна)
Магнітне осердя	225	2025	Сталь – 5 \$; нанокристал – 45 \$ × 45 грн/\$
Намотування котушки (пропорційно N)	90	10	1620 витків → 90 грн
Собівартість виробу, грн	440	2049	–

Вартість однієї години затримки руху на завантаженій ділянці оцінюється в 10000...50000 \$ (450000...2250000 грн). Приймаємо консервативну оцінку 450000 грн за один збій. Статистика свідчить, що на 100 фільтрів припадає один збій на рік через насичення сталевих осердь. Отже, на один фільтр:

$$\Delta C_{\text{над}} = \frac{450000}{100} = 4500 \text{ грн/рік}$$

Сумарна річна економія на один фільтр:

$$\Delta C_{\text{рік}} = 193 + 4500 = 4693 \text{ грн/рік}$$

Показники ефективності інвестицій:

- додаткові інвестиції (різниця в собівартості):

$$\Delta I = 2049 - 440 = 1609 \text{ грн}$$

- термін окупності:

$$T_{ok} = \frac{1609}{4693} \approx 4.1 \text{ місяця}$$

- Економія за 10 років експлуатації:

$$E_{10} = 10 \cdot 4693 - 1609 = 45321 \text{ грн}$$

Результати оцінки ефективності заміни сталевго осердя на нанокристалічне у фільтрі ЗБФ-1 дано в зведеній табл. 4.10 техніко-економічних показників.

Таблиця 4.10 – Ефективність заміни сталевго осердя на нанокристалічне у фільтрі ЗБФ-1 (на один виріб)

Показник	Значення
Собівартість сталевго фільтра, грн	440
Собівартість нанокристалічного фільтра, грн	2049
Додаткові інвестиції, грн	1609
Річна економія електроенергії, грн	193
Річна економія від запобігання збоям, грн	4500
Сумарна річна економія, грн	4693
Термін окупності, місяців	4,1
Чиста економія за 10 років, грн	45 321

Отже, заміна сталевго осердя на нанокристалічне у фільтрі ЗБФ-1 дозволяє зберегти індуктивність 2,5 Гн при зменшенні кількості витків з 1620 до 187 (у 8,66 раза), активного опору обмотки – з 10,2 до 1,18 Ом, сумарних втрат потужності – з 4,35 до 0,355 Вт. Добротність зростає з 5,4 до 47,4, що кардинально покращує вибірковість фільтра та пригнічення гармонік тягового струму, а значить і завадостійкість РК.

Незважаючи на вищу собівартість нанокристалічного фільтра (2049 грн проти 440 грн за сталевий), додаткові інвестиції окупаються менш ніж за 4,2 місяці завдяки річній економії електроенергії у розмірі 193 грн. на один виріб та, головне, запобіганню аварійним збоям (4500 грн/рік на один фільтр). За 10 років експлуатації чиста економія становить понад 45 тисяч гривень на один виріб.

Впровадження нанокристалічних осердь у фільтри типу ЗБФ-1 є економічно обґрунтованим і технічно виправданим, особливо на ділянках

залізниць з інтенсивним рухом та високим рівнем ЕМЗ (асиметрія тягового струму, наявність потужних гармонік).

Таким чином, підсумовуючи, економічний ефект від впровадження нанокристалічних фільтрів є комплексним і багаторівневим. Він включає пряму матеріальну економію на виробництві за рахунок зменшення кількості мідного проводу в 8...20 разів, що значно перевищує додаткові витрати на дорожчий магнітний матеріал. Зниження експлуатаційних витрат через вищу надійність, стійкість до підмагнічування та меншу чутливість до зовнішніх впливів. Економію на логістиці та монтажі завдяки меншій масі та габаритам виробів. Зменшення ризиків та втрат від аварійних простоїв, що є найбільшою складовою потенційного ефекту, оскільки вартість однієї години затримки руху може бути на кілька порядків вищою за вартість самого фільтра.

Остаточний термін окупності залежить від масштабів впровадження, вартості конкретних типорозмірів осердь (яка може знижуватися при серійному виробництві) та інтенсивності експлуатації на конкретній залізничній дільниці. Однак навіть при консервативних оцінках очікується, що додаткові інвестиції в нанокристалічні матеріали окупаються протягом один – три років завдяки зниженню витрат на мідний провід та зменшенню позапланових ремонтів.

#### **4.5. Висновки за розділом**

1. Обґрунтовано застосування нанокристалічних осердь для фільтрів систем залізничної автоматики. Вони поєднують високу індукцію насичення (1,2...1,3 Тл), надвисоку магнітну проникність (до 150 000) та низькі втрати, що дозволяє подолати обмеження сталі та феритів.

2. Експериментально підтверджено ефективну роботу нанокристалічних осердь до 200 кГц (імпеданс зростає з частотою, фазовий зсув – після 40 кГц). Заміна сталевого осердя в дроселях типу ЗБФ-1 на

нанокристалічне забезпечує менші габарити, стійкість до підмагнічування та ефективне придушення гармонік 300...1200 Гц.

3. Розраховано фільтри для ТРК-3 (2,5 Гн) та кодових реле (1,5 Гн) на осерді ONL-80x50x25. Кількість витків становить 188 та 146 відповідно, що більш ніж у 8 разів менше, ніж у серійному ЗБФ-1 (1620 витків). Це зменшує масу, габарити, витрати міді та підвищує надійність. Економічний ефект – пряма економія на міді (у 5–10 разів) перевищує додаткові витрати на нанокристалічне осердя; термін окупності – 1–3 роки завдяки зниженню простоїв та підвищенню безпеки руху.

4. Практична цінність – розроблені засоби підвищення завадостійкості РК шляхом впровадження котушок із нанокристалічним осердям можуть бути впроваджені при модернізації залізничної автоматики та зв'язку. Термін окупності фільтрів складає 4,1 місяців.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі дано нове рішення науково-технічної задачі – підвищення завадостійкості рейкових кіл залізничної автоматики, що працюють в умовах інтенсивних електромагнітних завад від системи тягового електропостачання.

На підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень, наведених в дисертації, сформульовано такі основні результати та висновки.

1. На основі проведеного ґрунтовного аналізу сучасного стану проблеми завадостійкості тональних і кодових рейкових кіл, як одного із основних елементів на залізничному транспорті, який відповідає за безпеку руху, зроблено такі висновки. В існуючих технології обслуговування і методах контролю параметрів РК відсутні вимірювання рівнів і спектру ЕМЗ. Засоби захисту РК від ЕМЗ тягового струму є морально і технічно застарілими. Індуктивно-ємнісні фільтри з феритовим осердям, резонансні контури налаштовані на певний спектр гармонік мають низьку ефективність на високих частотах, схильність до насичення сталевих осердь фільтрів і реакторів, значні масо-габаритні показники. Існуюча періодична технологія обслуговування РК не відповідає сучасному розвитку комп'ютерно-інформаційних систем та технологій, вимірювальної техніки і не забезпечує необхідну точність, контролює лише обмежену кількість параметрів в окремому РК. Все це призводить до значних експлуатаційних і часових витрат і має суб'єктивний характер.

2. Розроблено і науково обґрунтовано методи та засоби вирішення проблеми підвищення завадостійкості в рейкових колах, суть яких полягає у використанні нових нанокристалічних осердь котушок фільтрів і резонансних контурів і комплексному аналізі рівнів і спектрів електромагнітних завад в зворотному тяговому струмі, які безпосередньо впливають на їх функціонування.

3. Удосконалено математичну модель електромагнітної взаємодії між системою тягового електропостачання та рейковими колами з урахуванням ліній ВЛ СЦБ, ВЛ ПЕ 6(10) кВ і впливу заземлення опор контактної мережі, яка на відміну від існуючих представлена у вигляді дванадцятиполюсника і враховує зв'язок між контактною мережею, двома рейковими лініями, високовольтними лініями основного та резервного електроживлення (ВЛ СЦБ, ВЛ ПЕ 6(10) кВ), землею, що дозволило отримати розподіл струмів і напруг ЕМЗ вздовж ліній, чисельні значення коефіцієнтів поширення хвиль, частотні залежності імпедансів «тяговий контур – сигнальний контур» і стало науковим обґрунтуванням методу класифікації ЕМЗ за допомогою машинного навчання. Адекватність моделі перевірена за критеріями Фішера ( $F = 0,965 < F_{кр} = 1,109$  при рівні значущості  $\alpha=0,05$ ) та Стьюдента ( $|t| = 0,1558 < t_{кр} = 1,9647$ ). Відносна похибка не перевищує 2,34 %. Таким чином доведено придатність удосконаленої математичної моделі для інженерних розрахунків на стадії проектування, під час експлуатації для моніторингу ЕМЗ і визначення причин відмов.

4. Удосконалено комплексний метод експериментальних досліджень електромагнітних завад у кожному окремому рейковому колі, який виконується під час періодичних вимірювань параметрів РК на посту ЕЦ в нормальному і шунтовому режимах. Метод базується на використанні сучасних цифрових осцилографів (Hantek 6254 BC, Frinsi 1014D) та дозволяє вимірювати напругу і струм в контрольних точках РК, передбачених інструкціями з технічного обслуговування, аналізувати спектральний склад кодових сигналів і зворотних тягових струмів. Удосконалений алгоритм методу контролю параметрів відрізняється від існуючих тим, що включає перевірку працездатності рейкового кола в нормальному режимі з реєстрацією осцилограм напруг і струмів на живильному та релейному кінцях, обчислення параметрів чотириполісника (A, B, C, D) та вторинних параметрів (хвильовий опір, коефіцієнт поширення), вимірювання

електромагнітних завад і спектральний аналіз за допомогою швидкого перетворення Фур'є. Це забезпечує сумісність запропонованого методу з існуючими регламентами технічного обслуговування.

5. 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 системи залізничної автоматики без перерви в русі поїзда і перейти у подальшому від планово-попереджувальної технології технічного обслуговування рейкових кіл до обслуговування «за станом» об'єкту. Запропонований метод апробовано станції «Вокзальна» Дніпровського метрополітену, що підтверджується відповідним атком. Вимірювання проведено на виводах РК на кросових стативах, регламентованих інструкцією з ТО пристроїв СЦБ, що дозволяє виключити вплив проміжних пристроїв та спостерігати зміну спектру зворотного тягового і сигнального струмів в реальному часі.

6. Розроблено метод динамічного моніторингу параметрів РК і ЕМЗ, який включає одночасну реєстрацією сигналів в чотирьох послідовно розташованих рейкових колах. Запропонований метод апробовано станції «Вокзальна» Дніпровського метрополітену, що підтверджується відповідним атком. Вимірювання було проведено на виводах РК на кросових стативах, регламентованих інструкцією з ТО пристроїв СЦБ, що дозволяє виключити вплив проміжних пристроїв та спостерігати зміну спектру зворотного тягового і сигнального струмів в реальному часі.

7. Вперше розроблено метод класифікації електромагнітних завад на основі машинного навчання із паралельним застосуванням згорткової нейронної мережі CNN та класифікатора Random Forest. Реалізовано паралельне застосування двох моделей: згорткової нейронної мережі (1D CNN) для аналізу сирих часових рядів та класифікатора Random Forest (RF) на основі 15 вручну сконструйованих ознак. 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.

8. Експериментально підтверджено ефективну роботу нанокристалічних осердь котушок і фільтрів пристроїв залізничної автоматики до 200 кГц. Визначено параметри котушок фільтрів тональних (ТРК-3) і кодових рейкових кіл 50 Гц залізничної автоматики. Доведено, що впровадження фільтрів із нанокристалічним осердям дозволяє зменшити кількість витків котушок, тобто – витрати міді (майже в 8 разів), габарити (в 2...4 рази) та масу (в 3...6 разів) і є оптимальним варіантом для забезпечення завадостійкості РК при модернізації систем залізничної автоматики та зв'язку в розширеному діапазоні частот.

9. Проведена техніко-економічна оцінка заміни сталевого осердя на нанокристалічне фільтра ЗБФ-1 показала: собівартість нанокристалічного фільтра вища (2049,00 грн. проти 440,00 грн.), однак річна економія електроенергії становить 193,00 грн., а економія від запобігання збоям – 4500,00 грн. на один фільтр. Сумарна річна економія – 4693,00 грн., термін окупності додаткових інвестицій – 4,1 місяця, чиста економія за 10 років – понад 45 тис. грн. на один виріб. Впровадження є економічно обґрунтованим, особливо на ділянках з інтенсивним рухом та високим рівнем ЕМЗ.

У подальших наукових дослідженнях з підвищення завадостійкості РК доцільно реалізувати такі етапи: удосконалення технології обслуговування РК шляхом впровадження системи безперервного контролю параметрів РК і рівнів та спектру електромагнітних завад на окремому і одночасно на чотирьох РК з використанням алгоритмів машинного навчання для класифікації ЕМЗ і визначення їх джерел; розширення бази реальних сигналів ЕМЗ зворотнього тягового струму для донавчання моделей машинного навчання з метою підвищення їх узагальнюючої здатності.

Отримані результати науково-практичних досліджень з підвищення завадостійкості РК шляхом впровадження фільтрів із нанокристалічним

осердям дозволять за рахунок розроблених методів контролю параметрів РК і ЕМЗ у подальшому перейти від планово-попереджувальної технології обслуговування об'єктів залізничного транспорту до обслуговування «за станом»; сприятиме підвищенню функціональної безпеки та ефективності залізничного транспорту України в умовах його модернізації та євроінтеграції.

Практична значимість отриманих результатів підтверджується актами про впровадження результатів науково-дослідної роботи (додаток Б).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] “Інтеграція української залізниці до ЄС: підписано меморандум з Європейським залізничним агентством,” Євроінтеграція України. [Online]. Доступно: <https://eu-ua.kmu.gov.ua/news/integratsiya-ukrayinskoyi-zaliznytsi-do-yes-pidpysano-memorandum-z-yevropejskym-zaliznychnym-agentstvom/>. [Дата звернення: 12 Лютого 2026].
- [2] “Транспортна стратегія до 2030 року і роль залізниці в ній,” RAIL.insider. Національна транспортна стратегія, 5 Червня 2025. [Online]. Доступно: <https://www.railinsider.com.ua/rol-zaliznici-v-transportnij-strategiyi/>.
- [3] Р. Мірошник К. Федак, “Стратегічні напрями розвитку залізничного транспорту в Україні,” Економіка та суспільство, Т. 32, 2021, doi: 10.32782/2524-0072/2021-32-90.
- [4] “Про схвалення Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні,” Положення кабінету міністрів України, № 1556-р, 2 Грудня 2020. [Online]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-2020-%D1%80#Text>.
- [5] “Про затвердження державної програми розвитку цифрових технологій до 2030 року,” Положення кабінету міністрів України, № 320-р, 2 Квітня 2024. [Online]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/320-2024-%D1%80#Text>.
- [6] М. О. Костін, Теорія електричних кіл та електромагнітного поля. Дніпро, Україна, 2004.
- [7] В. Є. Редько, О. С. Кердан, В. Ю. Кердан, “Формування стратегічних орієнтирів діяльності підприємств залізничного транспорту,” Інноваційна економіка, Т. 81, № 7–8, с. 63–68, 2019.
- [8] І. В. Токманова, В. О. Овчиннікова, М. В. Корінь, “Напрямки та інструменти державного регулювання стратегічного розвитку залізничного транспорту,” Вісник економіки транспорту і промисловості, № 69, с. 114–127, 2020.

- [9] І. І. Рекун, “Стратегічні напрями розвитку залізничної галузі України,” Економіка та держава, № 4, с. 34–37, 2016.
- [10] І. О. Чудомех, “Стратегічне управління залізничним транспортом України,” Вісник економіки транспорту і промисловості, № 52, с. 187–190, 2015.
- [11] Ю. С. Бараш Т. Ю. Чаркіна, “Стратегія управління реформуванням залізничним транспортом України,” Вісник економіки транспорту і промисловості, № 53, с. 24–30, 2016.
- [12] В. О. Овчиннікова, “Особливості державного регулювання розвитку залізничного транспорту в Україні,” Економіка і суспільство, № 12, с. 129–135, 2017.
- [13] Ю. А. Папайка, О. Г. Лисенко, А. В. Бубліков, І. Г. Олішевський, “Проблеми електромагнітної сумісності потужних енергетичних об’єднань під час масового підключення відновлюваних джерел енергії,” Електротехніка та енергетика, № 1, с. 34–45, 2021, doi: 10.15588/1607-6761-2021-1-4.
- [14] Ю. Д. Думанський, О. І. Запорожець, А. В. Лук’янчиков, В. А. Глива, В. І. Клапченко, Г. Ю. Краснянський, “Електромагнітна безпека та електромагнітна сумісність технічних засобів,” Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія "Гірництво", № 16, с. 143–148, 2008.
- [15] Б. М. Бондаренко, І. О. Романцев, Г. Я. Мозолевич, “Підвищення надійності електромагнітних приладів забезпечення безпеки руху на залізничному транспорті,” Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту, № 33, с. 100–107, 2013.
- [16] Т. М. Сердюк, В. І. Гаврилюк, В. В. Мелешко, “Метод моделювання системи тягового електропостачання,” Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті, № 10, 2015.

- [17] Т. М. Сердюк В. І. Гаврилюк, “Електромагнітна сумісність системи тягового електропостачання з рейковим колом,” *Залізничний транспорт України*, Т. 3/2, с. 176–180, 2005.
- [18] T. Serdyuk V. Havryliuk, “Investigation of electromagnetic impact of traction current harmonics on track circuits,” in *Proc. 17th Int. Wroclaw Symp. and Exhibition on Electromagnetic Compatibility*, Wroclaw, Poland, 2004, pp. 260–263.
- [19] В. І. Гаврилюк, В. Г. Сиченко, Т. М. Сердюк, *Системи електропостачання залізничної автоматики, телемеханіки та зв'язку*. Дніпропетровськ, Україна: Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 2016.
- [20] T. Serdiuk, V. Kuznetsov, Ye. Kuznetsova, “On electromagnetic compatibility of railway circuits with the railway traction power supply system,” in *Proc. 2018 IEEE 3rd Int. Conf. Intell. Energy Power Syst. (IEPS)*, Kharkiv, Ukraine, Sep. 10–14, 2018, pp. 59–63.
- [21] T. Serdiuk, “Electromagnetic compatibility and power quality of traction and non-traction consumers,” in *Proc. Int. Symp. Electromagn. Compat. (EMC Europe 2020)*, Rome, Italy, Sep. 23–25, 2020, doi: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245735.
- [22] T. Serdiuk, R. Botnarevscaia, “Electromagnetic compatibility of railway radio communication with traction systems,” in *Proc. Int. Symp. Electromagn. Compat. (EMC Europe 2022)*, Gothenburg, Sweden, Sep. 5–8, 2022, pp. 604–607, doi: 10.1109/emceurope51680.2022.9900979.
- [23] T. Serdiuk, V. Havryliuk, M. Feliziani, K. Serdiuk, “Propagation of harmonics of the return traction current in railway lines,” in *Proc. Int. Symp. Electromagn. Compat. (EMC Europe 2019)*, Barcelona, Spain, 2019, pp. 550–555, doi: 10.1109/emceurope.2019.8872092.
- [24] T. Serdiuk, M. Feliziani, K. Serdiuk, “Study of return traction current harmonics,” in *Proc. Int. Symp. Electromagn. Compat. (EMC Europe 2020)*, Rome, Italy, Sep. 23–25, 2020, doi: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245808.

- [25] М. В. Панасенко, Ю. П. Гончаров, В. Г. Сиченко, “Проблеми електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги постійного струму і використання засобів силової електроніки для їх вирішення,” *Електротехніка і електроенергетика*, № 2, с. 22–28, 2009.
- [26] T. Serdiuk, “Electromagnetic compatibility and power quality of traction and non-traction consumers,” in *Proc. Int. Symp. Electromagn. Compat. (EMC Europe 2020)*, Rome, Italy, Sep. 23–25, 2020, doi: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245735.
- [27] С. Ю. Леонов О. Р. Боровик, “Дослідження роботи електронних пристроїв з урахуванням електромагнітної сумісності,” *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Нові рішення в сучасних технологіях*, Т. 4, № 6, с. 71–76, 2020.
- [28] В. О. Іванов, Є. І. Габрусенко, Л. Я. Ільницький, О. А. Щербіна, *Електромагнітна сумісність радіоелектронної апаратури*. Київ, Україна: НАУ, 2014.
- [29] Ю. О. Головін, С. М. Шолохов, І. І. Самборський, *Електромагнітна сумісність спеціальних радіозасобів електронних комунікацій. Частина I*. Київ, Україна: КПІ ім. І. Сікорського, 2024.
- [30] О. С. Яндульський О. О. Дмитренко, *Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем*. Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2016.
- [31] C. Changkai, L. Xiangli, S. Chunwei, D. Mingpeng, “Research and optimization of inverter electromagnetic compatibility system,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1798, p. 012051, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1798/1/012051.
- [32] Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) : [затверджено наказом Укрзалізниці від 07.10.2009 № 090-ЦЗ]. – Київ : Укрзалізниця, 2009. – (ЦШ-0060).
- [33] X. Fang et al., “Study on effectiveness of electromagnetic interference and shielding equipment,” *MATEC Web Conf.*, vol. 399, 2024, doi: 10.1051/mateconf/202439900017.

- [34] A. Kausar, I. Ahmad, T. Zhao, O. Aldaghri, H. Ibnaouf, M. Eisa, T. Lam, “Graphene nanocomposites for electromagnetic interference shielding—Trends and advancements,” *J. Compos. Sci.*, vol. 7, no. 9, p. 384, 2023, doi: 10.3390/jcs70903840.
- [35] R. Botnarevscaia, B. Puyjar, T. Serdiuk, F. Leferink, “Influence of high-quality installation and grounding on filter performance,” in *Proc. 7th IEEE Global Conf. Electromagn. Compat. (GEMCCON)*, Nusa Dua, Bali, Indonesia, Jan. 19–20, 2023.
- [36] C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2006, doi: 10.1002/0471758159.
- [37] H. W. Ott, *Electromagnetic Compatibility Engineering*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2009, doi: 10.1002/9780470508510.
- [38] C. Mao, F. G. Canavero, Z. Cui, D. Sun, “System-level vulnerability assessment for EME: From fault tree analysis to Bayesian networks—Part II: Illustration to microcontroller system,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 58, no. 1, pp. 188–196, Feb. 2016, doi: 10.1109/TEMPC.2015.2502591.
- [39] L. Musso, F. Canavero, B. Demoulin, V. Berat, “Radiated immunity test of a device with an external wire: repeatability of reverberation chamber results and correlation with anechoic chamber results,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat. (ISEMC)*, Boston, MA, USA, 2003, vol. 2, pp. 828–833, doi: 10.1109/ISEMC.2003.1236715.
- [40] K. L. Kaiser, *Electromagnetic Compatibility Handbook*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2005.
- [41] C. Kathalay, *A Practical Approach to Electromagnetic Compatibility*. [Видавецъ], 2020.
- [42] T. Williams, *EMC for Product Designers*, 5th ed. Oxford, U.K.: Newnes, 2016.
- [43] A. Andersson, P. Eliardsson, E. Axel, C. Hägglund, K. Wiklundh, “Deep learning based detection and classification of in-band interference,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, early access, 2024, doi: 10.1109/TEMPC.2024.3449434.

- [44] В. Г. Сиченко, “Інтеграція сонячної енергетики у систему тягового електропостачання постійного струму,” Вісник НТУ «ХПІ», 2015.
- [45] В. Г. Сиченко, А. В. Рогоза, М. М. Пулін, “Кількісна оцінка стійкості системи тягового електропостачання постійного струму за напругою,” Вісник Вінницького політехнічного інституту, № 3, с. 69–74, 2018.
- [46] Д. Р. Земський, В. Г. Сиченко, Д. О. Босий, “Моделювання сумісної роботи систем зовнішнього та тягового електропостачання залізниць змінного струму для оцінки якості електроенергії у несиметричних режимах,” Технічна електродинаміка, № 2, с. 74–85, 2020.
- [47] Д. Р. Земський, “Проблеми ефективної роботи системи поздовжнього електропостачання нетягових споживачів залізниць змінного струму,” ПрАТ ПМТЗ “Стандарт”, с. 36.
- [48] С. Яцько, Н. Карпенко, Я. Ващенко, В. Панченко, “Розвиток обладнання розподільних пристроїв тягового електропостачання. Частина I,” Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту, № 172, 2017.
- [49] О. М. Тихенко, “Загальні засади проектування електромагнітних екранів та екрануючих конструкцій,” Системи управління, навігації та зв’язку, Т. 1, № 59, с. 116–119, 2020.
- [50] Ю. С. Бондаренко, “Експериментальне дослідження впливу частоти модуляції тягового перетворювача електровозів постійного струму з асинхронним приводом на суміжні системи,” Електрифікація транспорту, № 8, с. 86–92, 2014.
- [51] Ю. С. Бондаренко, “Можливість реалізації активної фільтрації завад тягового струму у колах СЦБ та зв’язку електрифікованих залізниць,” Електрифікація транспорту, № 1, с. 77–81, 2011.
- [52] О. І. Семененко, О. Д. Супрун, Ю. О. Семененко, М. П. Ткаченко, “Дослідження ефективності роботи згладжувальних пристроїв перетворювальних агрегатів тягових підстанцій постійного струму,” Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 2018.

- [53] Я. В. Щербак Ю. О. Семененко, “Аналіз роботи пасивних фільтрів на виході тягової підстанції постійного струму,” Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 2015.
- [54] T. Serdiuk, “Measurement of electromagnetic interferences in the track circuits of a station,” in Proc. 10th Int. Symp. Electromagn. Compat. (EMC Europe 2011), York, U.K., Sep. 26–30, 2011, pp. 214–217.
- [55] Ю. О. Семененко, “Комбінований активний фільтр послідовного типу з імпульсною системою керування при формуванні зворотного зв’язку за струмом навантаження,” Вісник НТУ «ХП», № 12, с. 1121, 2015.
- [56] В. Ф. Кустов, Основи теорії надійності та функційної безпечності систем залізничної автоматики. Харків, Україна: УкрДАЗТ, 2008.
- [57] В. І. Мойсеєнко, Б. В. Чегодаєв, О. С. Зотова, “Методи діагностування систем залізничної автоматики,” Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 2014.
- [58] A. Shvets, A. Kryvonos, T. Serdiuk, M. Hayakawa, “Method of automatic monitoring of the lower ionosphere and lightning location using Tweek-Atmospherics,” Int. J. Electron. Appl. Res. (IJEAR), vol. 4, no. 1, pp. 1–14, Jun. 2017.
- [59] T. Serdiuk, “Modelling of influence of traction power supply system on railway automatic devices,” in Proc. Int. Symp. Electromagn. Compat. (EMC Europe 2017), Angers, France, Sep. 4–8, 2017.
- [60] В. І. Гаврилюк Т. М. Сердюк, “Телеметрична система для контролю параметрів сигналів рейкових кіл,” in II Міжнародна конференція "Телематика транспортних систем", Катовице, Польща, 2002, с. 185–190.
- [61] О. Васильєва П. Неєжмаков, “Метрологічна простежуваність результатів випробувань на електромагнітну сумісність за стандартами НАТО,” Український метрологічний журнал, № 2, с. 7–15, 2023.
- [62] T. Serdiuk V. Havryliuk, “Monitoring of code current quality in rail circuits,” Universal J. Control Autom., vol. 1, no. 3, pp. 74–78, 2013, doi: 10.13189/ujca.2013.010302.

- [63] О. О. Матусевич, “Математична модель аналізу збитку системи тягового електропостачання залізниць,” Наука та прогрес транспорту, № 3 (57), с. 77–87, 2015.
- [64] Л. П. Єрмоленко, “Електромагнітні завади на залізничному транспорті: теоретичні засади та класифікація,” Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, № 3, с. 31–36, 2019.
- [65] В. Пілінський, В. Попов, Ш. Шалілах, “Про класифікацію електромагнітних завад перетворювачів електроенергії,” Електроніка та Зв’язок, Т. 16, № 4, с. 187–192, 2011, doi: 10.20535/2312-1807.2011.16.4.246780.
- [66] Р. Т. Бибик Ю. М. Наконечний, “Дослідження впливу електромагнітних завад на функціонування систем зв’язку та радіолокації,” Комп’ютерні системи та мережі, Т. 6, № 1, 2024.
- [67] Д. В. Терещенко Ю. Ф. Зіньковський, “Екранування електронних приладів керування промислових електростанцій,” in Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції "Радіотехнічні проблеми, сигнали, апарати та системи", Київ, Україна, 22–24 Листопада 2022, с. 125–127.
- [68] О. В. Панова, “Екранування електромагнітних полів для електромагнітної безпеки та електромагнітної сумісності обладнання,” Управління розвитком складних систем, № 22, с. 207–213, 2015.
- [69] Ю. Ф. Зіньковський В. Г. Клименко, Електромагнітна, інформаційна захищеність та сумісність електронних апаратів. Житомир, Україна: ЖІТІ, 1999.
- [70] М. Г. Варбанець, Системи залізничної автоматики і телемеханіки: Навчальний посібник. Харків, Україна: УкрДАЗТ, 2008, 190 с.
- [71] П. Є. Михаліченко, “Гармонійний склад фідерних струмів при аварійних вимиканнях швидкодіючими вимикачами різних типів,” Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті, № 2, 2011, doi: 10.15802/ecsrt2011/16775.

- [72] M. E. Lakhachi, M. Miludi, H. Miludi, “Експериментальна електромагнітна сумісність кондуктивних електромагнітних завод від IGBT та MOSFET у блоці живлення,” Електротехніка та Електромеханіка, № 3, с. 38–43, 2024, doi: 10.20998/2074-272X.2024.3.05.
- [73] В. І. Мойсеєнко, М. С. Курцев, О. В. Лазарєв, Технології та технічні засоби систем керування рухом поїздів. Харків, Україна: УкрДУЗТ, 2020.
- [74] В. І. Мойсеєнко В. М. Бутенко, Безпечність спеціалізованих комп’ютерних систем. Харків, Україна: УкрДУЗТ, 2021.
- [75] І. Горбенко, О. Замула, Х. Ч. Лик, “Комплексне вирішення проблеми електромагнітної сумісності сучасних інформаційно-комунікаційних систем,” Радіотехніка, Т. 3, № 202, с. 106–115, 2020, doi: 10.30837/rt.2020.3.202.11.
- [76] Ю. І. Катков Є. Ю. Бєлих, “Нові інформаційні технології виявлення побічних компрометуючих електромагнітних випромінювань від електронно-обчислювальної техніки,” Наукові записки Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій, Т. 4, с. 25–33, 2020.
- [77] І. С. Рябенко, С. П. Шевчук, О. В. Мейта, Електрообладнання та електропостачання машин і установок геотехнічних виробництв. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.
- [78] М. Г. Вісін Д. О. Забаріло, “Підвищення електромагнітної сумісності рейкових кіл з електрорухомим складом подвійного живлення з асинхронними тяговими двигунами та тяговою мережею,” Наука та прогрес транспорту, № 40, с. 75–82, 2012, doi: 10.15802/stp2012/7011.
- [79] Ю. С. Бондаренко, “Експериментальне дослідження впливу частоти модуляції перетворювача частоти на гармонійний склад струму системи,” Електропостачання та електроустаткування, 2013.
- [80] В. Щека, І. Романцев, К. Ящук, “Дослідження впливу зворотного тягового струму на режими роботи тональних рейкових кіл,” 2012.

- [81] Т. М. Сердюк, “Дослідження впливу гармонік тягового струму електровозу на роботу рейкових кіл,” *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*, № 2, 2011.
- [82] T. Serdiuk, “Influence of the railway traction system on adjacent low-current devices,” in *15th Int. Zurich Symp. Tech. Exhib. Electromagn. Compat. (EMC Zurich’03)*, Zurich, Switzerland, 2003, pp. 397–400.
- [83] В. І. Гаврилюк Т. М. Сердюк, “До питання про перевірку параметрів кодового струму рейкового кола,” in *Матеріали III Міжнародної конференції "Телематика транспортних систем"*, Катовице, Польща, 2003, с. 127–135.
- [84] Т. М. Сердюк В. І. Гаврилюк, “Розподіл гармонік зворотного тягового струму на фідерній зоні та оцінка його впливу на роботу рейкових кіл,” in *Матеріали 18-го Міжнародного Вроцлавського симпозиуму з електромагнітної сумісності (EMC 2006)*, Вроцлав, Польща, 2006, с. 467–470.
- [85] Т. М. Сердюк В. І. Гаврилюк, “Рейкове коло в умовах електромагнітного впливу тягової мережі,” in *Матеріали 18-го Міжнародного Вроцлавського симпозиуму з електромагнітної сумісності (EMC 2006)*, Вроцлав, Польща, 2006, с. 482–485.
- [86] T. Serdiuk, H. T. Ansari, R. Botnarevscaia, “Electromagnetic influence of AC traction network on railway communication lines,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat., Signal Integrity Power Integrity (EMCSI)*, Spokane, WA, USA, Aug. 1–5, 2022, pp. 326–329, doi: 10.1109/EMCSI39492.2022.9889435.
- [87] W. Dai K. Ji, “Electromagnetic interference signal modulation recognition system based on SDR,” *Telecom*, vol. 5, no. 3, pp. 928–940, 2024, doi: 10.3390/telecom5030046.
- [88] L. Fang, X. Zu, Z. Huang, “Influence of electromagnetic pulses on microcontroller units,” *Appl. Sci.*, vol. 13, p. 8190, 2023, doi: 10.3390/app13148190.
- [89] Z. Zhang, Y. Zhou, Y. Zhang, B. Qian, “Strong electromagnetic interference and protection in UAV,” *Electronics*, vol. 13, p. 393, 2024, doi: 10.3390/electronics13020393.

- [90] X. Yang, “Integrated electromagnetic compatibility control method of naval vessel lifting control system,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2296, p. 012013, 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2296/1/012013.
- [91] T. Serdiuk, K. Serdiuk, V. Profatilov, D. Thomas, S. Greedy, H. H. Adhena, “Analysis of electrified systems and electromagnetic interference on railways,” in *Proc. 7th IEEE Global Conf. Electromagn. Compat. (GEMCCON)*, Nusa Dua, Bali, Indonesia, Jan. 19–20, 2023, pp. 48–49.
- [92] H. H. Adhena, T. Serdiuk, D. Thomas, S. Greedy, “Comparison of UK and Ukrainian railway systems based on their electromagnetic compatibility capabilities and electrification systems,” in *Proc. 7th IEEE Global Conf. Electromagn. Compat. (GEMCCON)*, Nusa Dua, Bali, Indonesia, Jan. 19–20, 2023.
- [93] Railway applications. Electromagnetic compatibility. Part 1: General, EN 50121-1, 2017.
- [94] Railway applications. Fixed installations. Protective provisions relating to electrical safety and earthing. Part 1: Protective provisions against electric shock, EN 50122-1, 2011.
- [95] H. Yao, Z. Tuan, J. Xiangfei, D. Jingli, “Time-domain characteristics of electromagnetic defibrillators (EDs),” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2478, p. 032027, 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2478/3/032027.
- [96] W. Lu et al., “Complexity evaluation method of electromagnetic interference of high-voltage switch based on feature extraction and GCC-GRU network,” *High Voltage*, vol. 9, no. 3, pp. 749–761, 2024, doi: 10.1049/hve2.12402.
- [97] IEC, IEC 61000-2-4:2002 Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 2-4: Environment – Compatibility Levels in Industrial Plants for Low-Frequency Conducted Disturbances, Geneva, Switzerland, 2002.
- [98] IEC, IEC 61000-4-5:2014 Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and Measurement Techniques – Surge Immunity Test, Geneva, Switzerland, 2014.

- [99] IEC, IEC 62236-1:2018 Railway Applications – Electromagnetic Compatibility – Part 1: General, Geneva, Switzerland, 2018.
- [100] IEC, IEC 62236-2:2018 Railway Applications – Electromagnetic Compatibility – Part 2: Emission of the Whole Railway System to the Outside World, Geneva, Switzerland, 2018.
- [101] Ministry of Health of Ukraine, DSN 239-96 State Sanitary Norms and Rules for Protection of Population from Electromagnetic Radiation, Київ, Ukraine, 1996.  
[Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0488-96>
- [102] М. Пантелят П. Мясоєдов, “Електромагнітна сумісність технічних об’єктів і систем: огляд системи та органів стандартизації Європейського Союзу та Федеративної Республіки Німеччина,” Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, Т. 1, № 9, с. 26–30, 2023.
- [103] В. С. Лазебний, В. В. Пілінський, В. Б. Швайченко, Електромагнітна сумісність електронних засобів. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 343 с.
- [104] В. В. Князєв, “Оновлення національних стандартів в сфері електромагнітної сумісності,” Вісник НТУ «ХПІ», 2016.
- [105] С. Ф. Каштанов, “Особливості європейського законодавства з електромагнітної сумісності електрообладнання та радіоелектронної апаратури,” Вісник НТУУ КПІ. Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування, № 63, с. 136–143, 2015.
- [106] П. Неєжмаков, С. Буряковський, О. Васильєва, В. Величко, Ф. Веніславський, С. Руденко, “Запровадження стандартів НАТО для підвищення електромагнітної стійкості та сумісності обладнання об’єктів критичної інфраструктури,” Український метрологічний журнал, № 1, с. 9–20, 2023.
- [107] Б. Д. Халмурадов, “Електромагнітна безпека та електромагнітна сумісність технічних засобів,” Системи обробки інформації, № 12, с. 66–68, 2015.

- [108] ДСТУ EN 61000-2-4:2017, Електромагнітна сумісність (ЕМС). Частина 2-4. Електромагнітна обстановка. Рівні сумісності щодо низькочастотних кондуктивних завад для промислових підприємств (EN 61000-2-4:2002, IDT). Київ, Україна: ДП “УкрНДНТ”, 2017, 24 с.
- [109] EN 50126-1:2017, Railway Applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) – Part 1: Generic RAMS Process. Brussels, Belgium: CENELEC, 2017, 60 p.
- [110] EN 50128:2011, Railway Applications – Communication, Signalling and Processing Systems – Software for Railway Control and Protection Systems. Brussels, Belgium: CENELEC, 2011, 86 p.
- [111] EN 50129:2018, Railway Applications – Communication, Signalling and Processing Systems – Safety-Related Electronic Systems for Signalling. Brussels, Belgium: CENELEC, 2018, 134 p.
- [112] Є. М. Косарев, “Математична модель керованої розподіленої системи тягового електропостачання постійного струму,” Електрифікація транспорту, № 14, с. 15–27, 2017.
- [113] Д. С. Горенко Г. В. Мельничук, “Аналіз впливу кондуктивних завад на систему з нетрадиційними джерелами електроенергії,” Енергетика: економіка, технології, екологія, № 4, с. 72–81, 2016.
- [114] В. Швайченко, В. Бакіко, В. Пілінський, Ш. Шалілех, “Аналіз впливу різних видів модуляції на спектральний склад кондуктивних завад,” Електроніка та Зв’язок, Т. 16, № 3, с. 216–220, 2011, doi: 10.20535/2312-1807.2011.16.3.266788.
- [115] Т. Н. Міщенко, “Перспективи схмотехнічних рішень і моделювання підсистем електричної тяги при високошвидкісному русі поїздів,” Електротехніка і електроенергетика, № 1, с. 19–28, 2014.
- [116] В. Щека О. Завгородній, “Розробка системи захисту рейкових кіл від електромагнітного впливу контактної мережі суміжної ділянки,” 2011.

- [117] В. І. Щека, “Математичне моделювання системи захисту рейкових кіл від електромагнітних завад,” *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*, № 12, 2016.
- [118] Г. Г. Камалтинов, В. П. Поздняк, К. В. Шутько, “Особливості оцінювання електромагнітної сумісності радіолокаційних засобів, які розміщуються на спільній позиції,” *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*, № 2(80), с. 106–112, 2024, doi: 10.30748/zhups.2024.80.14.
- [119] К. С. Васюта, В. В. Слободянюк, О. Б. Танцюра, Р. О. Качайло, “Порівняльний аналіз методів формування активних завад каналу супроводження по дальності радіолокаційним станціям з використанням технології сурогатних даних,” *Системи озброєння і військова техніка*, № 4 (72), с. 73–80, 2022, doi: 10.30748/soivt.2022.72.08.
- [120] С. Г. Бондаренко, Д. М. Складанний, А. О. Абрамова, *Технологічні вимірювання і прилади. Вимірювання рівня та витрат*. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020.
- [121] J. Martínez Rojas, J. Fernández, M. Fernández Muñoz, R. Montero, P. Espi, E. Díez-Jiménez, “A model-based systems engineering approach to the study of electromagnetic interference and compatibility in wireless microelectromechanical systems,” *Syst. Eng.*, vol. 27, 2023, doi: 10.1002/sys.21733.
- [122] G. Wang, C. Yu, C. Feng, W. Yao, Z. Zhao, N. Xue, L. Yao, “Modeling and analysis of ambient electromagnetic interference in multichannel neural recording systems for high-performance common-mode interference suppression,” *Biosensors*, vol. 14, p. 343, 2024, doi: 10.3390/bios14070343.
- [123] T. Serdiuk, “Device for definition of code parameters of automatic locomotive signalling and estimation of electromagnetic influence of traction system on it,” in *16th Int. Wrocław Symp. Exhib. Electromagn. Compat. (EMC 2002)*, Wrocław, Poland, 2002, pt. 1, pp. 281–284.
- [124] T. Serdiuk, V. Kuznetsov, K. Serdiuk, A. Nikolenko, Ye. Kuznetsova, A. Kuznetsova, “Improvement of maintenance of rail circuits,” in *Proc. 2019 IEEE*

6th Int. Conf. Energy Smart Syst. (2019 IEEE ESS), Київ, Ukraine, Apr. 17–19, 2019, pp. 28–32.

[125] O. Kuzenkov, T. Serdiuk, A. Kuznetsova, M. Tryputen, V. Kuznetsov, Ye. Kuznetsova, M. Tryputen, “Mathematical model of the dynamics of homomorphic objects,” in CEUR Workshop Proc. 1st Int. Workshop Inf. Commun. Technol. Embedded Syst. (ICT and ES 2019), Mykolaiv, Ukraine, Nov. 14–15, 2019, vol. 2516, pp. 190–205.

[126] T. Serdiuk K. Serdiuk, “Mathematical modeling of traction current harmonics distribution,” in Proc. Joint IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat., Signal Power Integrity, and EMC Europe, Glasgow, UK, Jul. 26–Aug. 20, 2021.

[127] В. С. Ступак С. О. Долматов, Основи радіочастотного контролю: практичний посібник, В. Ф. Олійник, Ed. Київ, Україна, 2004, 231 с.

[128] C. Carobbi, “Electromagnetic compatibility measurements,” in Measurement in Electronic and Electrical Engineering, 2015, doi: 10.1002/9781119021315.ch10.

[129] Evaluation of Electromagnetic Compatibility of Electric City Transport with the Automatics Systems / Serdiuk Tetiana, Binti Sapuan, Syarfa Zahirah, Mandaris Dwi, Serdiuk Kseniia, Radkevych Anatolii, Serchenko Maksym // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – 2023. – Vol. 2023-September : International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, Krakow, 4–8 September 2023. – DOI: 10.1109/EMCEurope57790.2023.10274245.

[130] Сердюк, Т. М. Аналіз параметрів якості електричної енергії та пристроїв для їх вимірювання / Т. М. Сердюк, М. С. Серченко // Наука та прогрес транспорту. – 2023. – № 3. – С. 13–23. – DOI: 10.15802/stp2023/296329.

[131] Serdiuk, T. Method for Defining Electromagnetic Interferencies in the Metro Track Circuits / Serdiuk T., Serchenko M. // 24th EEEIC International Conference on Environment and Electrical Engineering and 8th I and CPS Industrial and Commercial Power Systems Europe, EEEIC/I and CPS Europe : Proceedings,

Rome, 17–20 June 2024. – 2024. – DOI:  
10.1109/EEEIC/ICPSEurope61470.2024.10751038.

[132] Modernization of the power supply system applying solar cells and batteries / Tetiana Serdiuk, Maksym Serchenko, Anatolii Radkevych, Svitlana Serdiuk, Viktor Skalko// MATEC Web of Conferences. – 2024. – Vol. 390 : 3rd International Scientific and Practical Conference “Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport” (EOT-2023). – 01001.– DOI: 10.1051/matecconf/202439001001.

[133] Monitoring Electromagnetic Interference and Code Current in the Station Interlocking System / Tetiana Serdiuk, Maksym Serchenko, Volodymyr Profatylov, Rodica Botnarevscaia, Dwi Mandaris, Artem Smirnov // Asia-Pacific International Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Taipei, Taiwan, May 19–23, 2025 / IEEE. – Taipei, 2025.– P. 156–159.

[134] Canale, L. Study on EM Interferences Due to LED Lighting Sources and Their Impacts on the Railway Telecommunication System in Ukraine / Canale L., Serdiuk T., Serchenko M. // 2025 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2025 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, EEEIC / I and CPS Europe 2025, Chania, Crete, 15–18 July 2025 / Institute of Electrical and Electronics Engineer (IEEE). – 2025. – DOI: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope64998.2025.11169275.

[135] Serchenko, M. Dynamic Simulation of a Hybrid Solar Power System Under Fluctuating Irradiance Conditions / Serchenko M., Bekh Y., Serdiuk T. // 2025 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2025 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, EEEIC / I and CPS Europe 2025, Chania, Crete, 15–18 July 2025 / Institute of Electrical and Electronics Engineer (IEEE). – 2025.– DOI: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope64998.2025.11169086.

[136] Serdiuk, T. Monitoring Electromagnetic Interference in the Automation of Urban Rail Transport / Serdiuk T., Serchenko M., Smirnov A. // Proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe, 1–5

September 2025, Paris, 2025 / Institute of Electrical and Electronics Engineer (IEEE). – 2025. – P. 953–958. –DOI: 10.1109/EMCEurope61644.2025.11176332.

[137] EIT Urban Mobility, “EIT Urban Mobility Accelerator Programmes to Empower 86 Innovative Start-ups in European Mobility Sector,” 2023. [Online]. Available: <https://www.eiturbanmobility.eu/press-corner/eit-urban-mobility-accelerator-programmes-to-empower-86-innovative-start-ups-in-european-mobility-sector/>.

[138] UITP, “NEXUS project kicks off with new survey on improved metro operations,” 2024. [Online]. Available: <https://www.uitp.org/news/nexus-project-kicks-off-with-new-survey-on-improved-metro-operations/>.

**ДОДАТКИ**

## ДОДАТОК А

**Програмний код машинного навчання для класифікації  
електромагнітних завад у зворотному тяговому струмі**

```

# ===== ІМПОРТИ =====
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.fft import rfft, rfftfreq
from scipy.signal import resample, spectrogram
from scipy.stats import randint
import scipy.optimize
import pandas as pd
from sklearn.model_selection import train_test_split, RandomizedSearchCV
from sklearn.metrics import classification_report, roc_curve, auc
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
from sklearn.preprocessing import label_binarize
from sklearn.calibration import CalibratedClassifierCV
import tensorflow as tf
from tensorflow.keras import layers, models, callbacks
import warnings, os
warnings.filterwarnings('ignore')
plt.rcParams.update({'font.size': 16})

# ===== ПАРАМЕТРИ =====
FS = 12500          # частота дискретизації, Гц
DURATION = 1.0     # тривалість сигналу, с
N_SAMPLES = int(FS * DURATION) # кількість відліків
TRC_FREQS = [420, 480, 580, 720, 780, 425, 450, 475, 725, 775]
CLASSES = {0:'clean', 1:'harmonic', 2:'impulsive', 3:'narrowband', 4:'noise'}
NUM_CLASSES = 5
CSV_PATH = 'signal.csv'
FS_USER = 12500
SAVE_FIGURES = True
RESULTS_DIR = 'results'
if SAVE_FIGURES and not os.path.exists(RESULTS_DIR):
    os.makedirs(RESULTS_DIR)

# ===== ДОПОМІЖНА ФУНКЦІЯ ДЛЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ ГРАФІКІВ =====
def save_fig(fig, name):
    if SAVE_FIGURES:
        fig.savefig(os.path.join(RESULTS_DIR, name), dpi=150, bbox_inches='tight')

# ===== ГЕНЕРАЦІЯ СИНТЕТИЧНИХ ДАНИХ =====
def gen_signal(itype, snr_db=10, f_sig=None):
    """Генерує сигнал заданого типу завади (0..4)"""
    if f_sig is None: f_sig = np.random.choice(TRC_FREQS)
    t = np.linspace(0, DURATION, N_SAMPLES, False)
    clean = np.sin(2 * np.pi * f_sig * t) # амплітуда 1
    if itype == 0: noise = 0

```

```

elif itype == 1: # гармоніки
    noise = sum(a * np.sin(2*np.pi*f*t + np.random.uniform(0,2*np.pi)) for f,a in
[(50,0.7),(150,0.5),(250,0.3),(300,0.4),(500,0.2)])
elif itype == 2: # імпульси
    noise = np.zeros_like(t)
    for _ in range(np.random.randint(5,15)):
        pos = np.random.randint(0, N_SAMPLES)
        w = np.random.randint(6,25)
        noise[pos:min(pos+w,N_SAMPLES)] += np.random.uniform(2,8) *
np.hanning(w)[:min(w,N_SAMPLES-pos)]
elif itype == 3: # вузькосмугові
    f_narrow = np.random.choice([2625,2925,3375,3675,690,710,740,760])
    noise = 0.8*np.sin(2*np.pi*f_narrow*t+np.random.uniform(0,2*np.pi)) +
0.1*np.random.randn(N_SAMPLES)
else: # шум
    noise = 0.3*np.random.randn(N_SAMPLES) +
sum(np.random.uniform(1,3)*np.hanning(5) for _ in range(np.random.randint(0,3)))
if itype != 0 and np.std(noise) > 0:
    scale = np.sqrt(np.mean(clean ** 2) / (np.mean(noise ** 2) * 10 (snr_db/10)))
    noise *= scale
return clean + noise, itype, f_sig

def gen_dataset(n=3000):
    """Генерує набір даних (сигнали, мітки, частоти)"""
    X, y, f = [], [], []
    probs = [0.1,0.3,0.2,0.2,0.2]
    for _ in range(n):
        it = np.random.choice(range(NUM_CLASSES), p=probs)
        s, l, fr = gen_signal(it, np.random.uniform(5,20))
        X.append(s); y.append(l); f.append(fr)
    return np.array(X), np.array(y), np.array(f)

print("Генерація даних...")
X, y, f_vals = gen_dataset(3000)
X_norm = (X - X.mean(axis=1, keepdims=True)) / (X.std(axis=1, keepdims=True) + 1e-8)
X_norm = X_norm[..., np.newaxis]

# Розділення на train/val/test (70/15/15)
X_tr, X_tmp, y_tr, y_tmp = train_test_split(X_norm, y, test_size=0.3, stratify=y,
random_state=42)
X_val, X_te, y_val, y_te = train_test_split(X_tmp, y_tmp, test_size=0.5, stratify=y_tmp,
random_state=42)

# ===== МОДЕЛЬ CNN =====
def create_cnn():
    m = models.Sequential([
        layers.Input((N_SAMPLES,1)),
        layers.Conv1D(32,7,activation='relu',padding='same'), layers.BatchNormalization(),
layers.MaxPooling1D(4),
        layers.Conv1D(64,5,activation='relu',padding='same'), layers.BatchNormalization(),
layers.MaxPooling1D(4),
        layers.Conv1D(128,3,activation='relu',padding='same'), layers.BatchNormalization(),

```

```

layers.Conv1D(128,3,activation='relu',padding='same'), layers.BatchNormalization(),
layers.GlobalAveragePooling1D(),
layers.Dense(128,activation='relu'), layers.Dropout(0.5),
layers.Dense(NUM_CLASSES,activation='softmax')
])
return m

model = create_cnn()
model.compile(optimizer='adam', loss='sparse_categorical_crossentropy', metrics=['accuracy'])
model.fit(X_tr, y_tr, batch_size=64, epochs=50, validation_data=(X_val, y_val),
        callbacks=[callbacks.EarlyStopping(patience=4, restore_best_weights=True),
        callbacks.ReduceLROnPlateau(factor=0.5, patience=2)], verbose=0)

# ===== КАЛІБРУВАННЯ CNN (температурне масштабування) =====
proba_val = model.predict(X_val, verbose=0)
logits_val = np.log(np.clip(proba_val, 1e-12, 1-1e-12))
y_val_oh = tf.keras.utils.to_categorical(y_val, NUM_CLASSES)
def nll(T):
    p = tf.nn.softmax(logits_val / T).numpy()
    return -np.mean(np.sum(y_val_oh * np.log(p+1e-12), axis=1))
T_opt = scipy.optimize.minimize(lambda t: nll(t), 1.0, bounds=[(0.1,10.0)], method='L-BFGS-
B').x[0]
print(f'T_opt = {T_opt:.3f}')
def calibrate_cnn(proba, T): return tf.nn.softmax(np.log(np.clip(proba,1e-12,1-1e-
12))/T).numpy()

# ===== ВИЛУЧЕННЯ ОЗНАК ДЛЯ RANDOM FOREST =====
def extract_feat(sig, fs, f_sig):
    """Часові та спектральні ознаки для одного сигналу"""
    feats = {}
    feats['mean'] = np.mean(sig); feats['std'] = np.std(sig)
    feats['rms'] = np.sqrt(np.mean(sig ** 2)); feats['peak'] = np.max(np.abs(sig))
    feats['crest'] = feats['peak']/(feats['rms']+1e-8)
    feats['skew'] = pd.Series(sig).skew(); feats['kurt'] = pd.Series(sig).kurtosis()
    feats['outliers'] = np.sum(np.abs(sig - feats['mean']) > 3*feats['std'])
    fft = np.abs(rfft(sig)); freq = rfftfreq(len(sig), 1/fs)
    feats['fft_peak_f'] = freq[np.argmax(fft)]
    feats['fft_peak_mag'] = np.max(fft)
    def band_power(l,h): mask = (freq>=l)&(freq<=h); return np.sum(fft[mask] ** 2)
    feats['power_sig'] = band_power(f_sig-20, f_sig+20)
    feats['power_low'] = band_power(50,250)
    feats['power_mid'] = band_power(250,450)
    feats['power_high'] = band_power(800,2000)
    total = np.sum(fft ** 2)
    feats['snr_est'] = 10*np.log10((feats['power_sig']+1e-12)/(total-feats['power_sig']+1e-12))
    return np.array(list(feats.values()))

# Підготовка даних для RF (не нормалізовані сигнали)
X_raw, y_raw, f_raw = X, y, f_vals
X_tr_raw, X_tmp_raw, y_tr_raw, y_tmp_raw, f_tr_raw, f_tmp_raw = train_test_split(
    X_raw, y_raw, f_raw, test_size=0.3, stratify=y_raw, random_state=42)
X_val_raw, X_te_raw, y_val_raw, y_te_raw, f_val_raw, f_te_raw = train_test_split(

```

```

X_tmp_raw, y_tmp_raw, f_tmp_raw, test_size=0.5, stratify=y_tmp_raw, random_state=42)

X_tr_feat = np.array([extract_feat(s, FS, f) for s,f in zip(X_tr_raw, f_tr_raw)])
X_val_feat = np.array([extract_feat(s, FS, f) for s,f in zip(X_val_raw, f_val_raw)])
X_te_feat = np.array([extract_feat(s, FS, f) for s,f in zip(X_te_raw, f_te_raw)])

# ===== RANDOM FOREST З ПОШУКОМ ПАРАМЕТРІВ ТА КАЛІБРУВАННЯМ =====
X_train_val_feat = np.vstack([X_tr_feat, X_val_feat])
y_train_val = np.concatenate([y_tr_raw, y_val_raw])
rf = RandomizedSearchCV(RandomForestClassifier(random_state=42, n_jobs=-1),
                        {'n_estimators': randint(50,300), 'max_depth': randint(5,30),
                        'min_samples_split': randint(2,20), 'min_samples_leaf': randint(1,10)},
                        n_iter=20, cv=5, scoring='f1_macro', random_state=42, n_jobs=-1, verbose=0)
rf.fit(X_train_val_feat, y_train_val)
rf_cal = CalibratedClassifierCV(rf.best_estimator_, method='sigmoid', cv=5)
rf_cal.fit(X_train_val_feat, y_train_val)

# ===== ОЦІНКА НА ТЕСТОВОМУ НАБОРІ =====
pred_cnn = np.argmax(calibrate_cnn(model.predict(X_te, verbose=0), T_opt), axis=1)
pred_rf = rf_cal.predict(X_te_feat)
print("CNN classification report:\n", classification_report(y_te, pred_cnn,
target_names=list(CLASSES.values())))
print("RF classification report:\n", classification_report(y_te_raw, pred_rf,
target_names=list(CLASSES.values())))

# ===== ROC-КРИВИ =====
y_bin = label_binarize(y_te, range(NUM_CLASSES))
proba_cnn = calibrate_cnn(model.predict(X_te, verbose=0), T_opt)
proba_rf = rf_cal.predict_proba(X_te_feat)
plt.figure(figsize=(10,8))
for i in range(NUM_CLASSES):
    fpr_c, tpr_c, _ = roc_curve(y_bin[:,i], proba_cnn[:,i])
    fpr_r, tpr_r, _ = roc_curve(y_bin[:,i], proba_rf[:,i])
    plt.plot(fpr_c, tpr_c, label=f'CNN- {CLASSES[i]} (AUC={auc(fpr_c,tpr_c):.2f})')
    plt.plot(fpr_r, tpr_r, '--', label=f'RF- {CLASSES[i]} (AUC={auc(fpr_r,tpr_r):.2f})')
plt.plot([0,1],[0,1], 'k--'); plt.legend(loc='lower right', fontsize='small')
plt.xlabel('False Positive Rate'); plt.ylabel('True Positive Rate'); plt.title('ROC curves (One-vs-
Rest)')
plt.grid(); save_fig(plt.gcf(), 'roc_curves.png'); plt.show()

# ===== АНАЛІЗ КОРИСТУВАЦЬКОГО СИГНАЛУ =====
def estimate_freq(sig, fs, low=300, high=1000):
    f = rfftfreq(len(sig), 1/fs); mask = (f>=low)&(f<=high)
    return f[mask][np.argmax(np.abs(rfft(sig))[mask])] if np.any(mask) else 725.0

def analyze_user_signal(user_sig, fs_user, target_fs=FS, target_len=N_SAMPLES):
    if fs_user != target_fs: user_sig = resample(user_sig, int(len(user_sig)*target_fs/fs_user))
    if len(user_sig) > target_len: user_sig = user_sig[:target_len]
    else: user_sig = np.pad(user_sig, (0, target_len - len(user_sig)))
    f_sig = estimate_freq(user_sig, target_fs)
    feats = extract_feat(user_sig, target_fs, f_sig).reshape(1,-1)
    sig_norm = (user_sig - np.mean(user_sig)) / (np.std(user_sig) + 1e-8)

```

```

    prob_cnn = calibrate_cnn(model.predict(sig_norm[np.newaxis, :, np.newaxis], verbose=0)[0],
T_opt)
    prob_rf = rf_cal.predict_proba(feats)[0]
    return {'cnn_pred': np.argmax(prob_cnn), 'rf_pred': rf_cal.predict(feats)[0],
            'cnn_proba': prob_cnn, 'rf_proba': prob_rf, 'signal': user_sig, 'f_signal': f_sig}

# Виконання, якщо файл існує
try:
    data = pd.read_csv(CSV_PATH, header=None)
    user_sig = data[0].values.astype(np.float32)
    res = analyze_user_signal(user_sig, FS_USER)
    print("\nРезультати аналізу сигналу:")
    print(f'CNN: {CLASSES[res['cnn_pred']]}, RF: {CLASSES[res['rf_pred']]}')
    # Побудова графіків
    t = np.arange(len(res['signal']))/FS_USER
    fig, axs = plt.subplots(2,3, figsize=(12,8))
    axs[0,0].plot(t, res['signal']); axs[0,0].set_title('Часова реалізація')
    fft_f = rfftfreq(len(res['signal']), 1/FS_USER); fft_v = np.abs(rfft(res['signal']))
    axs[0,1].plot(fft_f, fft_v); axs[0,1].set_xlim(0,2000); axs[0,1].set_title('Спектр (БПФ)')
    axs[0,2].barh(range(NUM_CLASSES), res['cnn_proba']);
    axs[0,2].set_yticks(range(NUM_CLASSES), list(CLASSES.values()));
    axs[0,2].set_title('Ймовірності CNN')
    f, t_s, Sxx = spectrogram(res['signal'], FS_USER)
    axs[1,0].pcolormesh(t_s, f, 10*np.log10(Sxx+1e-10), shading='gouraud');
    axs[1,0].set_ylim(0,2000); axs[1,0].set_title('Спектрограма')
    axs[1,1].barh(range(NUM_CLASSES), res['rf_proba']);
    axs[1,1].set_yticks(range(NUM_CLASSES), list(CLASSES.values()));
    axs[1,1].set_title('Ймовірності RF')
    axs[1,2].axis('off') # пустий останній підграфік
    plt.tight_layout(); save_fig(plt.gcf(), 'user_signal_analysis.png'); plt.show()
except FileNotFoundError:
    print("Файл signal.csv не знайдено.")

```

## ДОДАТОК Б

## Акти про впровадження результатів дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії Серченко Максима Сергійовича

ЗАТВЕРДЖУЮ:  
 Перший проректор Українського державного  
 Університету науки і технологій  
 доктор технічних наук, професор  
 Анатолій РАДКЕВИЧ  
 « 24 » 04. 2026 р.



## АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня доктора філософії Серченко Максима Сергійовича

Акт складено про те, що результати дисертаційної роботи Серченко Максима Сергійовича «Підвищення завадостійкості рейкових кіл залізничної автоматики шляхом впровадження фільтрів з нанокристалічним осердям» використовуються в учбовому процесі на кафедрі «Автоматика та телекомунікації» Українського державного університету науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту».

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання при проектуванні, модернізації та експлуатації систем тягового електропостачання і пристроїв залізничної автоматики з метою підвищення їх завадостійкості та надійності, безпеки руху. Отримані результати застосовуються в процесі навчання за дисциплінами «Електромагнітна сумісність систем залізничної автоматики», «Електроживлення систем автоматики», «Електричні кола і лінії залізничної автоматики».

Теоретичні та практичні результати досліджень, рекомендації, отримані в дисертаційній роботі, використовуються також при виконанні студентами дипломних робіт на здобуття освітнього рівня «бакалавр» і «магістр».

Декан факультету КТС

Маловічко В.В



КОМУНАЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО «ДНІПРОВСЬКИЙ МЕТРОПОЛІТЕН»  
 ДНІПРОВСЬКОЇ МІСЬКОЇ РАДИ  
 (КП «ДНІПРОВСЬКИЙ МЕТРОПОЛІТЕН»)

вул. 128-ї Бригади Тероборони, 8, м. Дніпро, 49003, тел. (056) 770 82 47  
 e-mail: dpmetro@ukr.net, dpmetrokp@gmail.com, https://metro.dp.ua, код ЄДРПОУ 21927215

«26» 03 2026 р.

№ 03/26/26

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Серченко Максима Сергійовича на тему «Підвищення завадостійкості рейкових кіл залізничної автоматики шляхом впровадження фільтрів з нанокристалічним осердям»

Комісія у складі:

Голови комісії: начальника служби автоматики, телемеханіки та зв'язку КП «Дніпровський метрополітен» Знайко Вячеслава Михайловича;

Членів комісії:

Заступник начальника служби  
 з експлуатації Набок Віктор Федорович

головний інженер служби Яременко Роман Євгенійович

склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Серченко Максима Сергійовича, представлені на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 273 – Залізничний транспорт, впроваджені у практичну діяльність КП «Дніпровський метрополітен».

Підстава для впровадження:

Дисертаційна робота виконана відповідно до загальнодержавних програм розвитку транспортної інфраструктури та планів модернізації систем залізничної автоматики. Отримані автором наукові та практичні результати спрямовані на забезпечення надійної роботи пристроїв автоматики в умовах складного електромагнітного середовища, що є особливо актуальним для об'єктів метрополітену.

Характер впровадження:

1. Методи та алгоритми контролю параметрів кодових і тональних рейкових кіл на основі швидкого перетворення Фур'є впроваджені в роботу служби автоматики, телемеханіки та зв'язку Дніпровського метрополітену для оперативної діагностики та виявлення гармонійного складу

електромагнітних завад (у подальшому, ЕМЗ), що впливають на роботу рейкових кіл.

2. Метод класифікації електромагнітних завад із використанням машинного навчання (згорткові нейронні мережі, Random Forest) застосовано в системі моніторингу параметрів рейкових кіл і ЕМЗ для автоматичного визначення джерел завад (тягові інвертори, світлодіодне освітлення, комутаційні апарати) та оцінки їх впливу на функціонування систем автоматики.

Ефективність впровадження:

Впровадження результатів дисертаційної роботи дозволило:

– підвищити рівень електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання метрополітену з пристроями автоматики, що зменшило ризик хибних спрацьовувань рейкових кіл та систем АЛС-АРШ;

– скоротити час на пошук та усунення несправностей, пов'язаних із впливом електромагнітних завад;

– створити передумови для переходу від планово-попереджувального технічного обслуговування пристроїв автоматики до обслуговування об'єкта за станом.

Відповідальні особи від підприємства:

Голова комісії:

начальник служби автоматики,

телемеханіки та зв'язку  Вячеслав ЗНАЙКО

Члени комісії:

Головний інженер  Роман ЯРЕМЕНКО

Заступник начальника

з експлуатації  Віктор НАБОК

